



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## NÁVRH USKLADŇOVACÍ NÁDRŽE

DESIGN OF STORAGE TANK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. FILIP NOVÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RICHARD NEKVASIL, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2012/13

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Filip Nováček

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Návrh uskladňovací nádrže**

v anglickém jazyce:

### **Design of storage tank**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na konstrukční návrh uskladňovací nádrže s pevnou střechou. Součástí bude i statický pevnostní výpočet. Současně bude zpracována základní výkresová dokumentace.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Seznámení se s platnou legislativou u nás i ve světě.
3. Základní pevnostní výpočet a konstrukční návrh.
4. Pevnostní výpočet pomocí metody MKP.
5. Vytvoření výkresové dokumentace.

Seznam odborné literatury:

- [1] Schneider P.: Základy konstruování procesních zařízení, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1999.
- [2] Křupka V., Schneider P.: Konstrukce aparátů, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1998.
- [3] ČSN EN 14015 – Specifikace pro navrhování a výrobu nadzemních vertikálních válcových svařovaných ocelových nádrží s plochým dnem, zhotovování na místě provozování určených pro skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší, CEN květen 2005.
- [4] API Standard 650.
- [5] EEMUA – Engineering equipment and materials association, 183:99 Guide for Prevention of Bottom Leakage from Vertical Cylindrical Steel Storage Tanks, 1999.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne



prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je provést konstrukční návrh uskladňovací nádrže na petrolej. Práce je rozdělena na dvě části. V první části je práce zaměřena na seznámení se známými typy uskladňovacích nádrží, jejich částmi, využitím a výhodami. Dále je v práci stručně shrnuta legislativa týkající se této problematiky. V druhé části je samotný konstrukční návrh uskladňovací nádrže. Byla provedena pevnostní kontrola nádrže dle normy EN 14 015. Byla také provedena napěťová MKP analýza pláště a střechy nádrže. Výsledkem práce je návrhový výkres uskladňovací nádrže.

## **Klíčová slova:**

Uskladňovací nádrž, pevná střecha, plášť nádrže, střecha nádrže, dno nádrže, návrh nádrže

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to design of storage tank for petroleum. The thesis is divided into two parts. In the first part of the work is focused on introducing the known types of storage tanks, their parts, use and benefits. The thesis also briefly summarized legislation regarding this issue. The second part is the actual design of storage tank. It was the strength calculation tanks according to EN 14 015. It was also a voltage FEM analysis of shell and tank roof. Result of work is a design drawing of the storage tank.

## **Keywords:**

Storage tank, fixed roof, tank shell, roof tanks, tank bottom, tank design

## **Bibliografická citace mé práce: VŠKP dle ČSN ISO 690**

NOVÁČEK, F. *Návrh uskladňovací nádrže*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 96 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D..

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Richardu Nekvasilovi, Ph.D. za vstřícnost, ochotu, cenné rady a připomínky při zpracování této diplomové práce.

Rád bych také poděkoval Ing. Pavlu Lošákovi, za pomoc při tvorbě MKP analýzy.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval zcela samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně 24.5.2013

.....  
Podpis

# Obsah

<b>1. Úvod</b>	<b>6</b>
<b>2. Přehled uskladňovacích nádrží</b>	<b>7</b>
2.1. Vertikální uskladňovací nádrže	7
2.1.1. Základy nádrže	8
2.1.1.1. Základy bez betonové výztuže	8
2.1.1.2. Základy s armovanou betonovou výztuží	9
2.1.1.3. Základy pro atypické podloží	10
2.1.2. Dno nádrže	10
2.1.2.1. Jednoduché dno	10
2.1.2.2. Neúplně podepřená dna	11
2.1.2.3. Dvojitá dna	11
2.1.3. Plášť nádrže	12
2.1.3.1. Svařování pláště	12
2.1.4. Pláště otevřených nádrží	13
2.1.5. Střecha nádrže	13
2.1.5.1. Pevná střecha	14
2.1.5.2. Plovoucí střecha	15
2.1.6. Příslušenství nádrží	17
2.2. Kulové nádrže	17
2.3. Speciální nádrže	18
2.3.1. Kapkové a toroidní nádrže	18
2.3.2. Nádrže na zkapalněný plyn	19
2.3.3. Víceválcové nádrže	19
2.3.4. Ocelové nadzemní vodojemy	20
<b>3. Legislativa</b>	<b>21</b>
<b>4. Zadání uskladňovací nádrže</b>	<b>22</b>
<b>5. Jednotlivé části uskladňovací nádrže</b>	<b>23</b>
<b>6. Pevnostní výpočet uskladňovací nádrže</b>	<b>25</b>
<b>7. MKP analýza</b>	<b>55</b>
7.1. Výpočtový model	55
7.2. Napěťová analýza	57
<b>8. Závěr</b>	<b>65</b>
<b>9. Seznam použité literatury</b>	<b>66</b>
<b>10. Seznam příloh</b>	<b>67</b>
<b>11. Přílohy</b>	<b>68</b>

# 1. Úvod

Tématem této diplomové práce je návrh uskladňovací nádrže. Tato zařízení mají důležité zastoupení v průmyslu a energetice. Slouží jako zásoba nebo sklad surovin, produktů a meziproduktů. V elektrárnách slouží jako zásobárna upravené vody do parního okruhu, nebo jako reservoár vody do chladících okruhů. Mohou sloužit i jako zdroj vody do hasicích systémů ve výrobních firmách, chemických závodech a elektrárnách.

Svou roli hrají uskladňovací nádrže i v politice státu. Státní firma MERO ČR a.s. provozuje centrální tankoviště ropy u Kralup nad Vltavou. Tankoviště slouží jako strategická zásoba ropy pro Českou republiku v případě výpadku dodávek ropy. Tímto je naše republika soběstačná pro výrobu ropných produktů po dobu 90 dnů.

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. První část práce je rešeršní zpracování známých typů uskladňovacích nádrží, jejich funkcí, popisem jednotlivých částí a výhodami. Dále se čtenář může seznámit s platnou normou pro návrh uskladňovacích nádrží v Evropské unii.

V druhé části se již práce zabývá řešením konkrétní nádrže s pevnou střechou, dle obdrženého zadání. Jsou zde popsány jednotlivé části nádrže. Dále je proveden pevnostní výpočet dle EN 14 015 Požadavky na navrhování a výrobu na místě zhotovených nadzemních vertikálních válcových nádrží s plochým dnem na skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší teplotě. Plášť a střecha nádrže je také zkontrolována pomocí MKP analýzy v programu Ansys Workbench.

Součástí práce je i návrhový výkres uskladňovací nádrže.



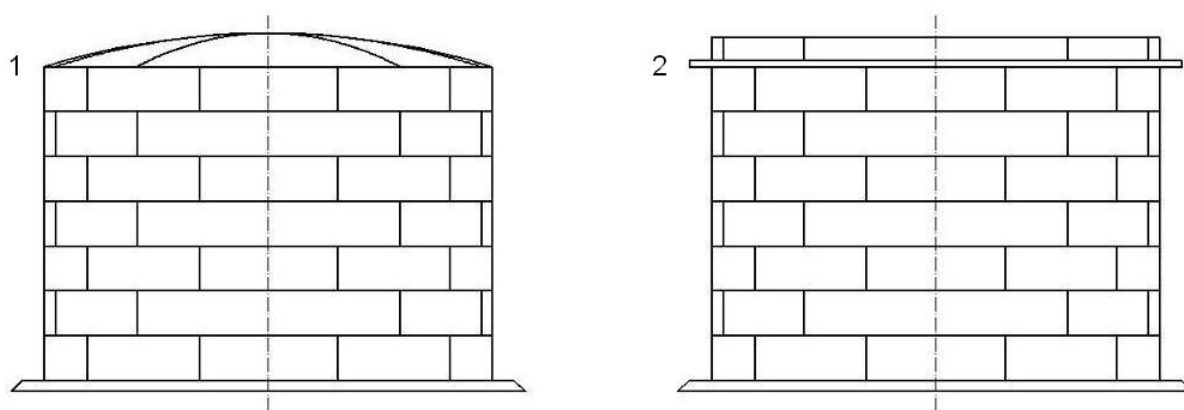
## 2. Přehled uskladňovacích nádrží

### 2.1. Vertikální válcové nádrže

Vertikální válcové nádrže jsou určeny pro skladování kapaliny bez tlaku, respektive se předpokládá při provozu pouze zatížení hydrostatickým tlakem skladované kapaliny. Při napouštění nebo vypouštění nádrže může v důsledku výfuku a nasávání vzduchu vznikat v nádrži přetlak nebo podtlak, jehož velikost je dána nastavením pojistných ventilů. Rozměry nádrží menších a středních objemů jsou typizovány, jejich rozměry tudíž vyplývají z požadovaných objemů. V případě stavby nádrže v záplavových nebo přímořských oblastech, kde je podloží tvořeno naplaveninami a šterky je únosnost půdy značně snížena, jsou proto nádrže stavěny pro potřebné objemy o menších výškách a větších průměrech [1].

Vertikální uskladňovací nádrže se obecně staví pro objemy v rozmezí od  $20\text{m}^3$  do  $50\,000\text{m}^3$ , průměry od 3,5m do 90m a výšky od 4m do 23m [2]. Lze stavět i nádrže o větších kapacitách a rozměrech. Například v Centrálním tankovišti ropy v Kralupech nad Vltavou mají největší nádrže objem  $125\,000\text{m}^3$ , jejich průměr činí 85m a výška 25m. Limity pro maximální objemy se stále posouvají s lepšími se technologií válcování plechu. Moderní válcovací stolice jsou schopny zaručit dokonalé proválcování plechu větší tloušťky. Tím pádem lze vyrobit nádrž většího průměru a výšky.

Nádrže jsou stavěny většinou ve dvojím provedení – s pevnou střechou, nebo s plovoucí střechou, viz obr.2.1. Volba konstrukčního řešení závisí na druhu uskladněné kapaliny. V nádržích s pevnou střechou jsou skladovány netěkavé kapaliny, potravinářské produkty a těžké olejové produkty. Těkavé kapaliny a ropa jsou skladovány v nádržích s plovoucí střechou, které oproti nádržím s pevnou střechou mají malý parní prostor. Toto řešení zajišťuje lepší protipožární ochranu a zároveň snižuje množství ztrát odparem. Toto pravidlo nemusí být dodrženo, pokud by při skladování mohlo dojít ke snížení kvality produktu [1].



Obr. 2.1: Nádrž s pevnou střechou (1), nádrž s plovoucí střechou (2)

Během provozu uskladňovací nádrže se mohou vyskytovat druhy namáhání uvedené v tabulce 2.1. Druh zatížení označené body 1 až 4 případně bodem 5 uvažujeme při statickém výpočtu, tj. při návrhu uskladňovací nádrže, zatížení dle bodů 6 až 9 jsou stavy havarijní, které se posuzují až dodatečně [2].

Tab. 2.1: Druhy zatížení a místa projevení [2]

	Druh zatížení	Nádrž s pevnou střechou	Nádrž s plovoucí střechou
		působí na	působí na
1	Hydrostatický tlak	plášť	plášť
2	Přetlak/podtlak	plášť i střechu	-
3	Tíha sněhu	střechu	-
4	Tlak větru	plášť i střechu	plášť
5	Seismicita	převážně plášť	plášť
6	Plnění nádrže do střechy	plášť i střechu	-
7	Sedání základů	plášť i střechu	plášť
8	Vznik nedovoleného přetlaku nebo podtlaku	plášť i střechu	-
9	Obetonování nádrže	plášť i střechu	-

### 2.1.1. Základy nádrže

Celá konstrukce nádrže je postavena na vlastních základech. Základy nádrží musí vyhovovat množství požadavků přispívajících ke zvýšení provozní spolehlivosti. Důraz je kladen na dostatečnou tuhost základu a ochranu dna nádrže před zemní vlhkostí. Existují tři základní typy provedení základů [1]:

- prosté základy bez betonové výztuže
- základy s armovanou betonovou výztuží
- základy pro atypická podloží

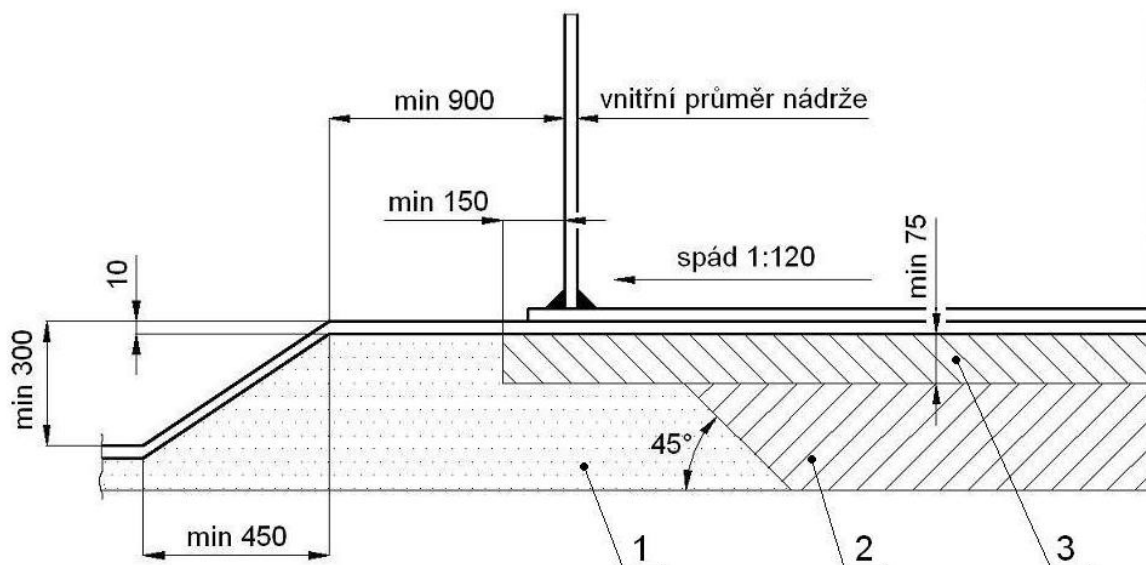
#### 2.1.1.1. Základy bez betonové výztuže

Základy musí být nejméně 300mm vysoké, aby případná srážková voda mohla odtéct a dno nádrže zůstalo v suchu. Je nutno počítat i se sednutím nádrže při zkoušce těsnosti, které je prováděna vodou a dalším sesedáním nádrže během vlastního provozu[1].

Složení základů (obr.2.2):

- 1 – hrubý zaválcovaný štěrk
- 2 – udusaný štěrk
- 3 – hrubý písek, případně směs písku a štěrku

Proti pronikání zemní vlhkosti musí být základ naolejován, pokryt asfaltem nebo jiným způsobem stabilizován. Tato ochrana je ještě pokryta 10mm vrstvou písku, aby při svařování nádrže nedošlo k poškození izolační vrstvy. Zešíkmená část násypu se upravuje po dokončení montáže nádrže. Zešíkmená plocha je zalita asfaltem tak, aby srážková voda nemohla zatékat pod základy nádrže.



Obr. 2.2: Základy bez betonové výztuže

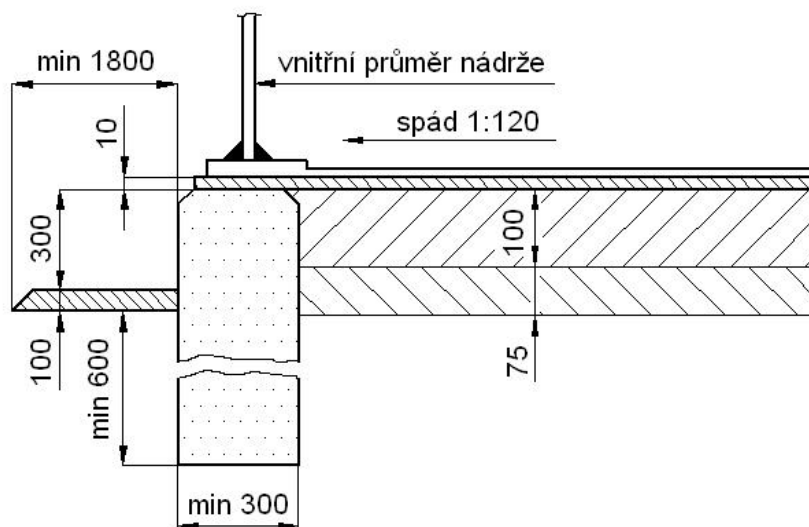
### 2.1.1.2. Základy s armovanou betonovou výztuží

Základy s armovanou betonovou výztuží se používají, pokud hrozí poškození základů, nebo nerovnoměrné sesedání nádrže, které by mělo za následek poškození nádrže případně připojovacího potrubí. Základy bývají použity na staveništích, které leží na místech se zvýšenou seismicitou, na poddolovaném území, na vrstvách tzv. plastické hlíny, která může dočasně vydržet vysoké zatížení, avšak během určité doby dochází k nadměrnému sesedání, na bahnitě nebo navezené půdě nacházející se na nebo pod povrchem[1].

Hlavním prvkem tohoto druhu základů je masivní betonový armovaný prstenec, který zabraňuje nepříznivému působení geologických podmínek na staveništi. Prstenec rozkládá zatížení od pláště nádrže, dále zabraňuje usmyknutí okraje podloží pod nádrží v případě podmočení, udržuje pohromadě materiál zaválcovaný uvnitř prstence, zabraňuje erozivnímu poškození základů a také působí jako ochrana proti zemi vlhkosti.

Vně prstence je vrstva šterku, nad ní vrstva hrubého písku a vše je uzavřeno vrstvou izolace jako u prostých základů.

Základy jsou znázorněny na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Základy s armovanou betonovou výztuží

### 2.1.1.3. Základy pro atypická podloží

Základy pro atypická podloží jsou většinou postavena na velmi málo únosné půdě, kde vlivem zatížení dochází k postupné konsolidaci podloží vytlačováním vody v něm obsažené. Stavba základů začíná navršením asi 3m vysokého násypu písku. Na náspu je následně smontována nádrž s provizorním dnem s plastické fólie. Nádrž je následně naplněna vodou. Tím začne konsolidační proces, při kterém začne jak násep a podloží sesedat. Po sesednutí se nádrž nazvedne, vzniklé nerovnosti se vyplní novým násypem a povrch se upraví do roviny, uvalcuje a opatří se izolační vrstvou. Nakonec je nádrž nazpět spuštěna a opatřena plechovým dnem. Práce je velmi nákladná a zdoluhavá, jedná se o nejobtížnější způsob stavby základů [1].

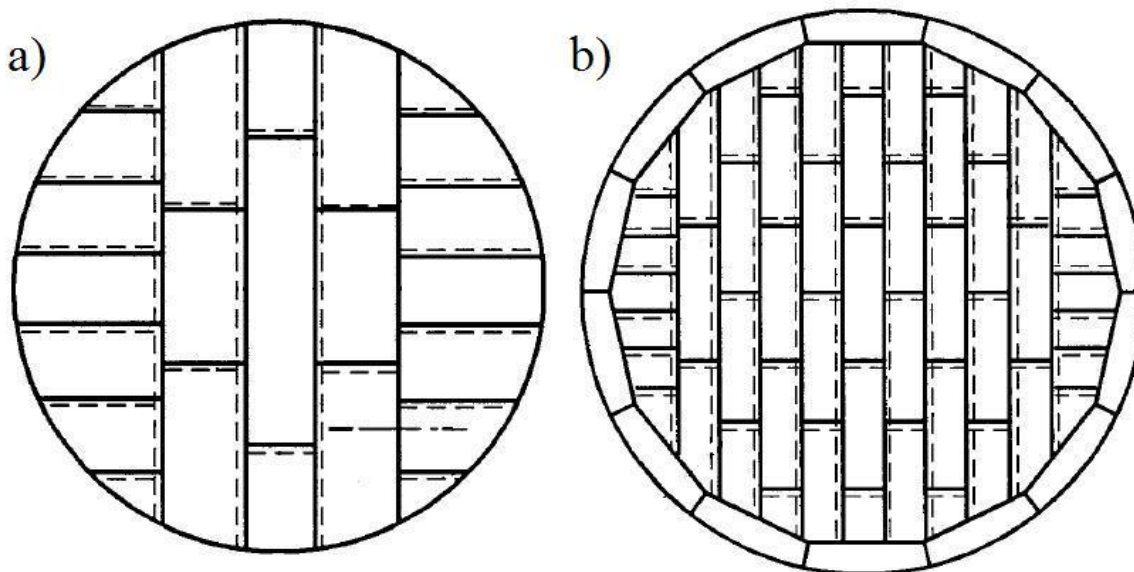
### 2.1.2. Dno nádrže

#### 2.1.2.1 Jednoduché dno

Dno nádrže je svařeno z ocelových obdélníkových plechů jednoho formátu. Pro nádrže do průměru pláště 15m jsou předepsány plechy tloušťky 5mm, pro větší průměry jsou předepsány plechy tloušťky 6mm. Plechy mohou být svařeny natupo, přeplátováním nebo kombinovaně, viz obrázek 2.4 [1].

Pláště menších nádrží jsou přivařovány přímo k plechovému dnu. Dle normy EN 14 015 musí být pláště o průměru větším jak 12,5m stavěny na obvodovém věnci [3]. Ve starší literatuře se místo výrazu věnec můžeme setkat s výrazem okolek. Věnec na obvodě je plechový přechod mezi pláštěm a dnem nádrže. Svařuje se ze segmentových plechů o minimální šířce 650mm a tloušťce 8-14mm. Tloušťka okolků závisí na tloušťce pláště. Všechny tupé svary jsou podkládány přistehovanými podložními pásky. Nejmenší rozměr pásky činí 30 x 5 mm. Těsnost dna je zkoušena vakuovým zařízením [1].

Dna nádrží musí být vyspádována v poměru 1:120. Směr spádování může být na střed nádrže, k obvodu nádrže, centrálnímu žlabu, nebo kalové jímce. Provedení je závislé na požadavcích zákazníka.



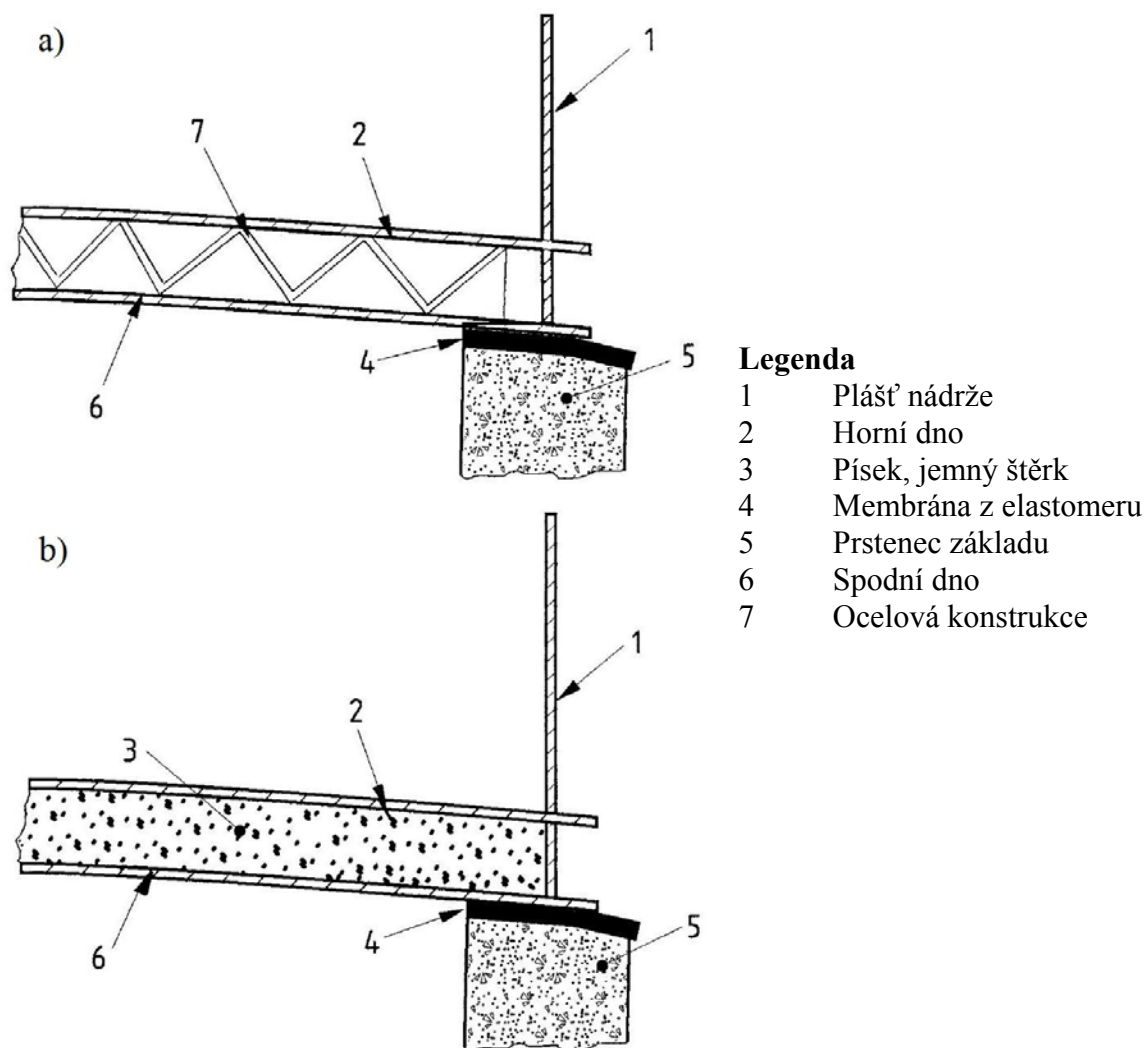
Obr.2.4: a) s plechy dna na okraji, b) s věncem na okraji [4]

### 2.1.2.2. Neúplně podepřená dna

Jedná se o dna nádrží, které nejsou podepřeny souvislým základem. Dna jsou pak podepřena konstrukcí z ocelových sekcí, nebo zpevněnými betonovými nosníky. Spoje mezi plechy dna se spojují tupým svarem [3].

### 2.1.2.3. Dvojitá dna

Dvojitá dna nám zajišťují dokonalou nepropustnost nádrže v případě, kdy se ve dnu objeví díra. Je nepravděpodobné, aby došlo k poruše obou vrstev dna. Dna musí být navrženy tak, aby se během odstávky dala zkontrolovat, jestli nedochází v úniku kapaliny. Dva složitější příklady konstrukce dvojitého dna jsou znázorněny na obrázku 2.4 [3].



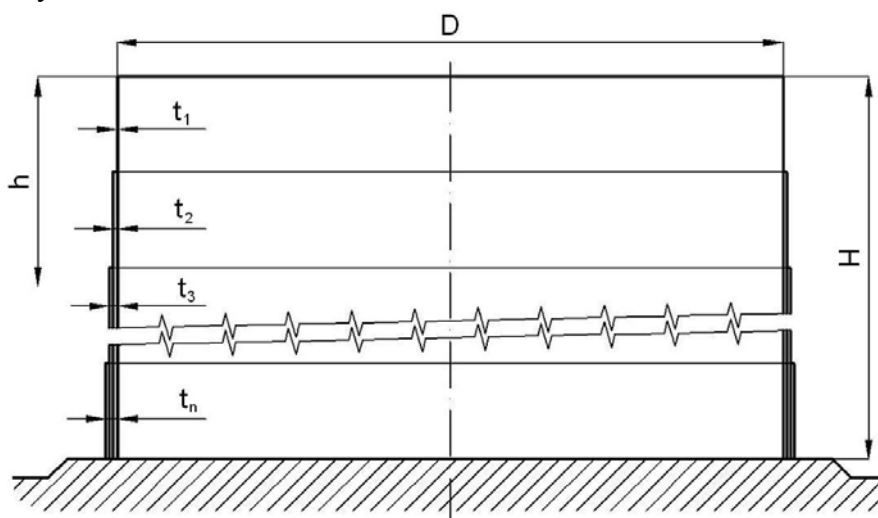
Obr. 2.5: Případy konstrukce dvojitého dna [4]

### 2.1.3. Plášť nádrže

Válcové pláště nádrže jsou svařovány z tabulí plechu jednoho formátu. Plechy tloušťky menší jak 12mm se připravují opracováním hran a předehtím na kratších stranách. Dotvarování probíhá až na stavbě. Plechy tloušťky 12mm a víc se nejprve opracují na hranách, následně jsou předehty a zkruženy na požadovaný průměr [1].

Maximální tloušťka plechu pláště se liší dle použitého materiálu. Například dle tabulkových hodnot v normě EN 14 015, která specifikuje navrhování, výrobu a provoz nadzemních vertikálních nádrží, se maximální rozměr tloušťky plechu pohybuje v rozmezí 10-40mm dle materiálu [3].

Tloušťka plechu pláště je stanovena výpočtem. Protože u všech nádrží, pro skladování kapalin, je zatížení hydrostatickým tlakem, jehož hodnota s výškou narůstá, bývá tloušťka plechů různá, viz Obr. 2.6. Dole jsou plechy větší tloušťky, nahoře menší. Jednotlivé „patra“ se nazývají luby.



Obr. 2.6: plášť nádrže s luby

Stejně jako je stanovena maximální tloušťka plechu pláště, je stanovena i minimální tloušťka pro horní lub. Její hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Minimální tloušťka horního lubu [2].

Průměr pláště nádrže v [m]	Minimální tloušťka horního lubu v [m]
do 15,25	5
15,25-36,6	6
36,6-61	8
nad 61	10

#### 2.1.3.1. Svařování pláště

Pláště uskladňovacích nádrží jsou svařovány natupo, plechové díly musí být na sebe přesně slícované [1]. Svary musí být plně provařeny. Pokud je svařována nádrž s plovoucí střechou, musí být zajištěno, aby převýšení svarového kovu bylo minimální [3]. Plášť je ke dnu přivařen oboustranným koutovým svarem.

Svařování provádí automaty nebo poloautomaty. Pláště může svařovat i kvalifikovaný svářeč s potřebným osvědčením. Svařování se provádí při teplotě plechu vyšší jak  $0^{\circ}\text{C}$ . Tímto

zajistíme dokonalé provaření se základním kovem. Svary jsou pak značeny identifikačním číslem svařeče ve vzdálenosti do 30mm od okraje svaru.

#### 2.1.4. Plášť otevřených nádrží

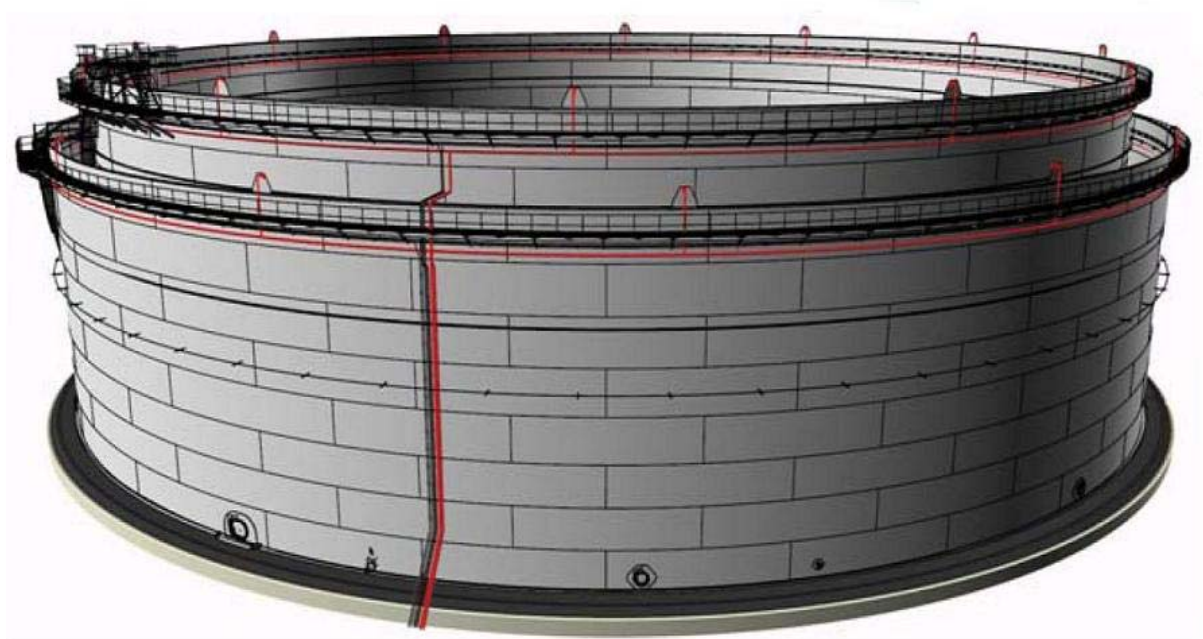
Otevřený plášť nádrží s plovoucí střechou si vyžaduje konstrukční úpravu horního okraje. Okraje bývají vyztuženy jedním nebo více prstenci. Prstenec může být využit i jako ochoz. Plášť je znázorněn na obrázku 2.7 [1].

Stabilita nádrže je ohrožena.:

- větrem, a to za stavu, kdy je nádrž prázdná. Jedná se o případy, kdy je nádrž ve stavu montáže, nebo při vypuštění nádrže kvůli kontrole či odstávce.
- sesedáním podloží v případě zemětřesení

Pro tyto někdy až extrémní zatěžovací stavy musí být navrhovaný výztužný límec dostatečně tuhý, aby zamezil např. zborcení nebo roztržení nádrže. Nádrž si díky tomu drží stále svůj válcový tvar.

Výztužné prstence jsou zhotoveny z normalizovaného profilu, nebo z tvarových plechových segmentů. Pokud výztužný prstenec slouží jako ochoz, je dle standardů umístěn cca. 1100mm pod horním okrajem pláště. Ten je pak ještě vyztužen tvarovanou tyčí L profilu.



Obr. 2.7: Plášť otevřené nádrže + záchytná nádrž [5]

#### 2.1.5. Střecha nádrže

Střecha uskladňovací nádrže může být pevná, nebo plovoucí. Vše závisí na uskladňovaném médiu. Ve speciálních případech, např. pro skladování zkapalněného plynu se používá kombinace těchto dvou způsobů. Pevné střechy mohou být samonosné, nebo podepřené. U plovoucích střech existuje více řešení. Každý výrobce používá vlastní provedení [1].

### 2.1.5.1. Pevné střechy

Dle průměru nádrže, jejího zatížení a ekonomického hlediska lze užít dva typy pevných střech – samonosné nebo podepřené [1].

Samonosná pevná střecha je sestavena z ocelové kostry a plynotěsně svařené skořepiny. Pro nádrže s ropnými produkty platí, že kostra nesmí být přivařena ke skořepině. Malý parní prostor zajišťuje vhodná konstrukce střechy s malým převýšením, a okrajovým úhlem nepřesahující hodnotu  $25^\circ$ . Kostra Jetřichy se svařena z normalizovaných profilů U, I nebo L. Hlavním nosným prvkem kostry jsou paprskovitě svařené žebra vycházející z lucernového prstence a končící v patním prstenci. Patní prstenec zachycuje rozpěrné síly od žeber a vyztužuje horní okraj válcového pláště. Stálou polohu žeber zajišťují mezižební prstence, které jsou tvořeny z rovných dílů, a proto mají tvar polygonu. Z pevnostního hlediska bývá u středních a velkých nádrží lucernový a patní prstenec nejkritičtějšími místy. Je nutno je podrobněji analyzovat. Konstrukce prstence je tvořena složitějším svařeným profilem.

Podle velikosti průměru nádrže je volen i typ střechy. U nádrží do průměru pláště 15m se střecha obejde bez kostry. Tvoří ji pouze samotná skořepina, která je schopna přenést dané zatížení střechy nádrže. Pro nádrže o průměru pláště 15-50m se aplikuje výše popsáný typ střechy s koustou. Střechu nádrže o větším průměru pláště je možno řešit podepřením střechy vnitřními sloupy, nebo užitím samonosné střechy. Pro samonosnou střechu je však zapotřebí analyzovat únosnost střechy, protože zatížení na střeše roste s druhou mocninou průměru nádrže, což vede v užití mohutnějších profilů žeber a tím i k nárůstu její hmotnosti. S vyšší hmotností narůstá i cena střechy. S rostoucími rozměry klesá i její stabilní rezerva.

Podepřený nesamonosný typ střechy má tvar velmi plochého kužele. Okrajový úhel střechy nepřesahuje hodnotu  $5^\circ$ . Skořepina střechy je tvořena svařenými plechy. Provedení kostry se liší od samonosného typu. Tu tvoří poměrně hustě rozmístěná radiální žebra a několika polygonovými prstenci podepřenými sloupy. Skořepina musí volně ležet na koustě. Výhodou tohoto typu střechy je elementárně jednoduchý výpočtový model. Žebra i prstence jsou uspořádány jako prosté nosníky na dvou podporách. Na koustu lze pohlížet jako na systém staticky určitých nosníků a jejich sloupů, které se posuzují jako kloubově uložení vzpírané pruty. Konstrukce je staticky určitá. Při zvětšování průměru střechy již nemusíme zvětšovat dimenzi nosných prvků jako u samonosné střechy. Zvětšení průměru již bereme jako přidání další sekce na vnějším průměru.



### 2.1.5.2. Plovoucí střechy

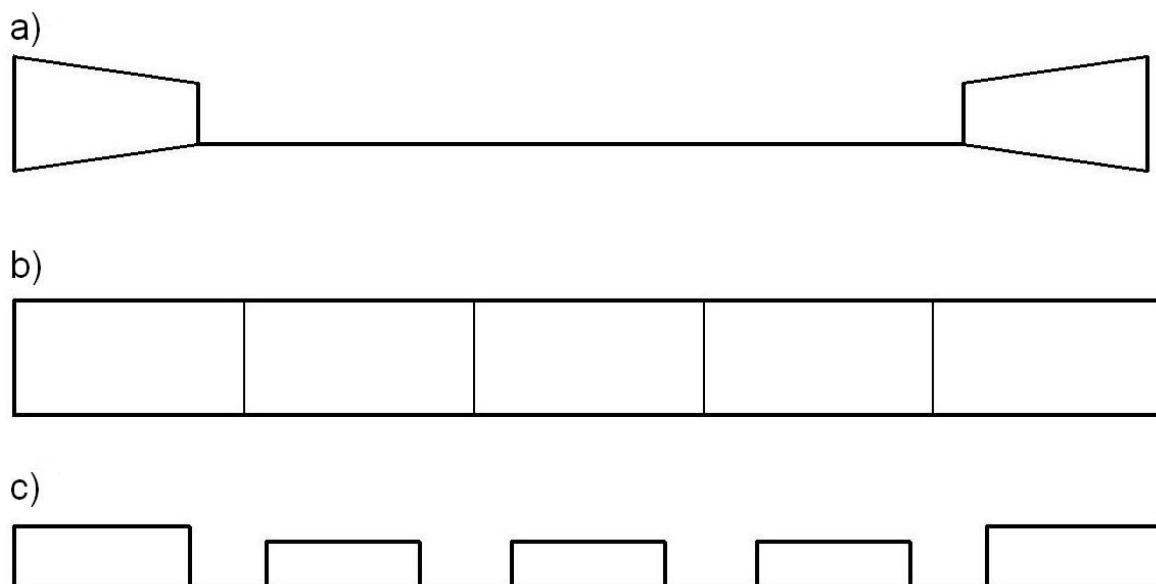
Pro skladování těkavých kapalin, jako je ropa, benzín a apod. se používají nádrže s plovoucí střechou [1].

Jejich výhoda spočívá v tom, že je z velké části odstraněno riziko výbuchu a požáru. Plovoucí střecha zajišťuje, že mezi hladinou a střechou nevzniká žádný parní prostor, tudíž místo, kde by mohlo dojít ve vzniku výbušné směsi z odparu uskladňovaného média a vzduchu. Při naplňování a vyprazdňování nádrže střecha vždy sleduje hladinu kapaliny. V případě vzniku požáru mohou hořet pouze plyny ve spárách mezi pláštěm a pontonem. Na plovoucí střeše je instalování mezikruží ze zádržných plechů, které pak při případném požáru zachycuje hasící pěnu a vyplňuje prostor spár. Tím je snížena investice na hasící zařízení, protože se hasí pouze v místě požáru, ne na celé střeše.

Další výhodou plovoucí střechy jsou minimální ztráty odparem skladovaného média.

Nevýhodou oproti nádržím s pevnou střechou je, že může dojít k znečištění obsahu nádrže srážkovou vodou.

Nejběžnější konstrukční typy plovoucích střech jsou jednopalubové, dvoupalubové a kazetové (obr. 2.8). Pro případné prorezivění plechu a následné potopení celé střechy, je střecha rozdělena na velký počet uzavřených oddělení.



Obr. 2.8: a) jednopalubová plovoucí střecha, b) dvoupalubová plovoucí střecha  
c) kazetová plovoucí střecha

Věvec dvoupalubových plovoucích střech je tvořen množstvím vodotěsných komor. Kruhový prostor uvnitř střechy vyplněn plechy tloušťky okolo 5mm. Horní a spodní paluba je od sebe vzdálena cca. 200mm.

Kazetové střechy mají svůj název od toho, že jsou složeny z velkého množství kazet, jednotného rozměru (např. 2500x2500x250). Jedná se o nejbezpečnější typ střech. Kazety na okraji střechy jsou opáleny na kruhový tvar. Opálené konce jsou plynotěsně zavařeny k obvodovému pontonu.

Mezi přednosti kazetových střech patří:

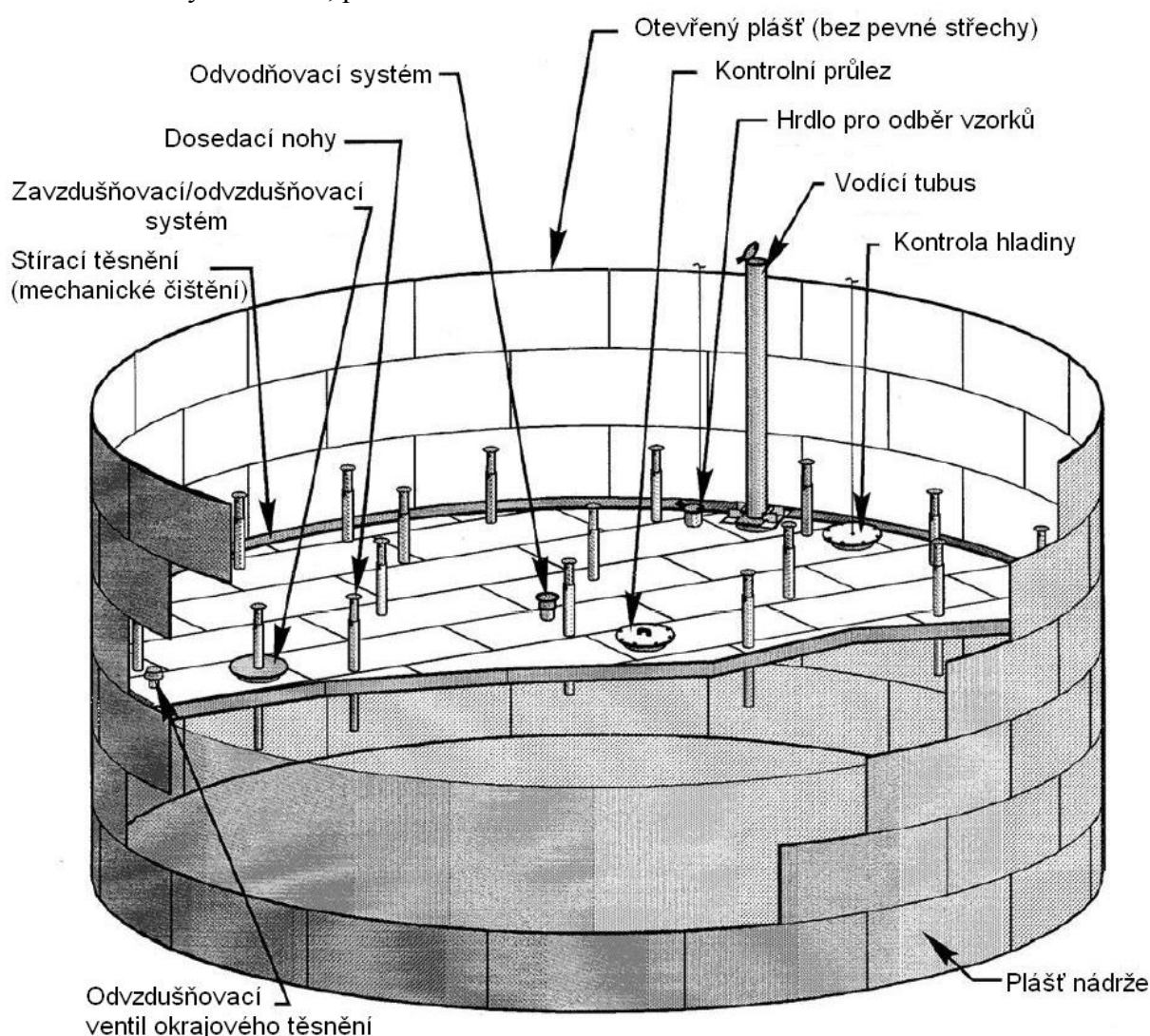
- jednotlivé kazety představují samostatný objem. I při prorezavění většího počtu kazet se nevyskytuje riziko potopení střechy

- jednotný tvar kazet umožňuje stavebnicovou výrobu střechy. Kazety jsou vyráběny sériově, zmenšuje se množství potřebných přípravků, zvyšuje se produktivita práce

Každá plovoucí střecha musí být vybavena minimálně tímto zařízením (obr. 2.9):

- několika průlezy
- sklopným žebříkem umožňující vstup na střechu při libovolné hladině kapaliny
- teleskopickými stojany, na kterých stojí střecha při odstávce nádrže
- systémem na odvod dešťové vody, většinou se jedná o trubkový pantograf
- vodivým uzemněním střechy (přes ocelové lanko je střecha spojena s pláštěm nádrže)
- těsnící a stírací systém na okraji střechy
- zádržné plechy pro hasící pěnu

Okrajový ponton je důležitou součástí střechy. Zajišťuje plynulý chod střechy, jsou na něm umístěna těsnění, které musí zajišťovat i těsnost v případě posunu střechy vlivem větru. Těsnění musí být trvanlivá, plně funkční a otěruvzdorná.



Obr. 2.9: Příslušenství dvoupalubové plovoucí střechy [6]

### 2.1.6. Příslušenství nádrží

Pro všechny typy uskladňovacích nádrží je společné základní příslušenství. Sestává se z těchto položek [1]:

- boční průlez o minimálním průměru hrdla 600mm slouží ke vstupu do nádrže a zároveň k větrání nádrže během čištění. Dle průměru nádrže bývají průlezy umístěny na nádrže v počtu 1 až 3 kusy.
- pravoúhlý nebo také čistící průlez slouží k čištění nádrže od kalů. Spodní hrana průlezu je v jedné rovině se dnem nádrže. Dle normy je šířka průlezu 1230mm. Výška je 300mm, nebo 915mm. Při výšce průlezu 915mm lze do nádrže vjet i vozíkem.
- inspekční průlez na střeše má průměr 500 nebo 600mm. Pomocí otvoru lze provést kontrolu nádrže zevnitř bez vyprázdnění nádrže. Při čištění nádrže také slouží jako větrací otvor.
- odvzdušňovací hrdla jsou umístěny na střeše nádrže. Slouží jako vyrovnávače tlaku mezi vnitřkem nádrže a okolím. Při skladování těkavých kapalin jsou nádrže osazeny dýchacími ventily s pojistkou proti vniknutí jiskry nebo plamene.
- vstupní a výstupní hrdla, přepadová hrdla, hrdla pro odběr vzorků, odkalovací hrdla atd.
- na vnějším povrchu pláště a střechy jsou umístěny schody, plošiny a zábradlí pro bezpečný pohyb osob po nádrži
- hasicí zařízení
- zařízení pro ohřev nebo chlazení uskladněného média

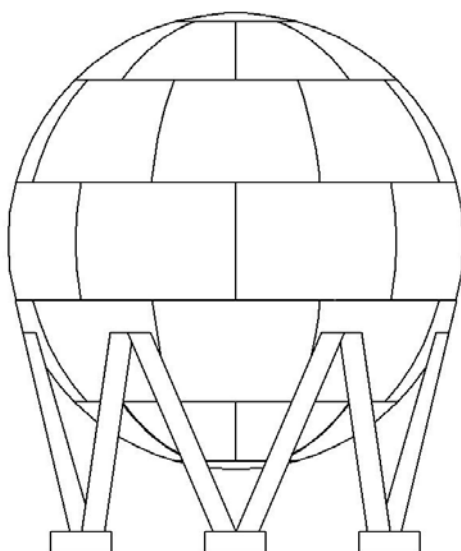
### 2.2. Kulové nádrže

Kulové nádrže jsou používány pro skladování velkých objemů pod tlakem. Jejich tvar je výhodný jednak z hlediska spotřeby materiálu (nejlepší poměr mezi povrchem a objemem), tak i z hlediska napjatosti (obr. 2.10). Velkoobjemové kulové nádrže se staví pro tyto účely [1]:

- nadzemní vodojemy
- technologické nádrže např. pro odsolování ropy
- tlakové plynojemy pro zemní plyn
- bezpečnostní kryty jaderných reaktorů

Pro skladování kapalin se staví kulové nádrže do objemu 1600 m<sup>3</sup>. Jedním z hlavních důvodů, proč nejsou stavěny nádrže o větším objemu, je příliš vysoké membránové napětí od hydrostatického tlaku. Bylo by nutno použít plechy větších tloušťek, což není výhodné z technologického hlediska. Pro skladování plynu pod tlakem lze užít nádrže o větším objemu.

Kulový tvar nádrže zajišťuje vyrovnanou membránovou napjatost po celém povrchu skořepiny a je poloviční oproti válcové nádrži stejného průměru. Kulové nádrž lze považovat za nejekonomičtější, protože díky poloviční napjatosti a výhodnému poměru mezi povrchem a objemem dosáhneme úspory materiálu.



Obr. 2.10: Kulová nádrž

## 2.3. Speciální nádrže

### 2.3.1. Kapkové a toroidní nádrže

Nádrže kapkového tvaru byly vyvinuty ve 30. letech v USA pro požadavky skladování velkých objemů lehkého benzínu, které mají velkou tenzi par při běžných letních teplotách. Kapalina je skladována pod tlakem. Tvar nádrže vychází z tvaru kapky ležící na rovině. Povrch kapky odpovídá plášti nádrže a představuje plochu konstantní membránové napjatosti [1]. Pro tento tvar pláště lze použít rovnici 1:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{p}{\sigma} \quad (1)$$

Nádrže tohoto tvaru mají nízkou membránovou napjatost, na plášť jsou použity plechy menších tloušťek, cca. 6mm.

Nádrže jsou dimenzovány na vnitřní přetlak, mohou být uzavřeny a nedochází u nich ke ztrátám odvětráním. Vlivem vysokých teplot okolí a slunečního záření dochází k rozpínání skladovaného média, čímž se zvyšuje vnitřní přetlak. Nádrž tuto změnu kompenzuje sama změnou tvaru (v malém rozmezí). Objem nádrže lze stupňovat do té meze, až tlak na dno nádrže dosáhne únosnosti základů. Nádrže se konstruují pro objemy do 6500 m<sup>3</sup>.

Výraznější zvětšení objemu umožňují toroidní nádrže. Jejich tvar se skládá z řady toroidních, anuloidových a navzájem přecházejících ploch. Takto vzniklá plocha již není plochou konstantní napjatosti, jako v případě kapkové nádrže, ale napjatost zůstává téměř čistě membránová.

Anuloidové a kulové plochy nádrže se svařují z tenkých plechů a tloušťce 6-8 mm. V místě tvarového přechodu jsou vyztuženy prstenci. Pro situace, kdy je nádrž prázdná, musí být součástí nádrže podpůrná konstrukce zajišťující tvarovou stálost nádrže. Vyztužená nádrž se schopna unést vnější zatížení (podtlak, sníh, tlak větru, vlastní hmotnost vč. izolace), jakož i přetlak, na který byla nádrž dimenzována.

### 2.3.2. Nádrže na zkapalněné plyny

Pro technické účely je nutno skladovat i plyny ve zkapalněném stavu. Nejčastěji se takto skladují propan, butan, etylen, čpavek, kyslík, oxid uhličitý a helium. Plyny jsou skladovány při nízké teplotě (izotermický způsob), nebo při zvýšeném tlaku (tlakový způsob) [1].

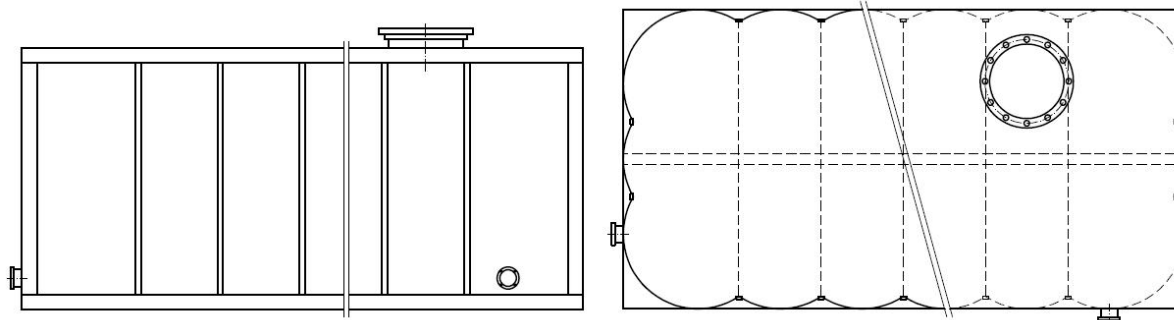
Nádrže pro skladování plynu při snížené teplotě jsou dvouplášťové. Prostor mezi oběma pláštěmi je vyplněn izolační vrstvou. Nádrže musí být vyrobeny z materiálu se zaručenou vrubovou houževnatostí při teplotách od  $-30$  do  $-270^{\circ}\text{C}$ . Materiál musí být také dobře svařitelný. Zvýšená pozornost se u těchto nádrží věnuje zbytkovému pnutí po svařování a defektoskopické kontrole svarových spojů.

Nádrže pro skladování plynu pod tlakem mají kulový nebo válcový tvar. Jsou dimenzovány na maximální tlak sytých par, odpovídající maximální teplotě okolí. Jsou slabě izolovány, pracovní tlak v zásobníku udržuje chladicí kompresorová jednotka. Ekonomický význam je do objemu  $1000\text{ m}^3$ .

### 2.3.3. Víceválcové nádrže

Prostor, kde má být nádrž umístěna, nám někdy nedovoluje používat klasické válcové nádrže. Je tedy žádoucí, aby nádrž měla tvar kvádru, který lépe využívá prostor. Rovná stěna takové nádrže je namáhána pouze hydrostatickým tlakem. Ten způsobuje, že se stěna začíná prohýbat. Proto je možno buďto zvětšit tloušťku stěny, nebo použít žebrové vyztužený stěn nádrže. Obě tyto řešení jsou nákladné z hlediska množství použitého materiálu. Taký musíme vzít v úvahu, že silnější a tím pádem těžší plechy mohou vyžadovat při stavbě těžší techniku, tudíž se zvyšují i náklady na montáž. Proto se využívají na stěny těchto nádrží tvary válcové plochy – válcové panely, které při stejném zatížení mají menší tloušťku plechu. Je zde aplikovaná podobná myšlenka jako u toroidních nádrží. Tyto víceválcové nádrže jsou pak převážně namáhány membránovým napětím. Nádrže se skládají z množství válcových panelů, plochého dna i víka. Vše je umístěno do obdélníkového rámu, svařeného z běžných válcovaných profilů. Rám nádrže může mít i rozměry běžných přepravních kontejnerů, pokud chceme nádrže převážet. Typický příklad tohoto typu nádrže je znázorněn na obrázku 2.11. [1]

Pro lepší schopnost pláště nádrží odolávat hydrostatickému tlaku, je plášť uvnitř nádrže v místě spojů válcových panelů vyztužen táhly. Táhla nám zajistí další úsporu materiálu. Táhla lze taky zaměnit za prolamované přepážky, které mohou umožnit skladování více druhů kapalin v jedné nádrži, protože nádrž je tvořena více navzájem oddělenými objemy. Řešení nachází význam např. u skladování pohonných hmot.

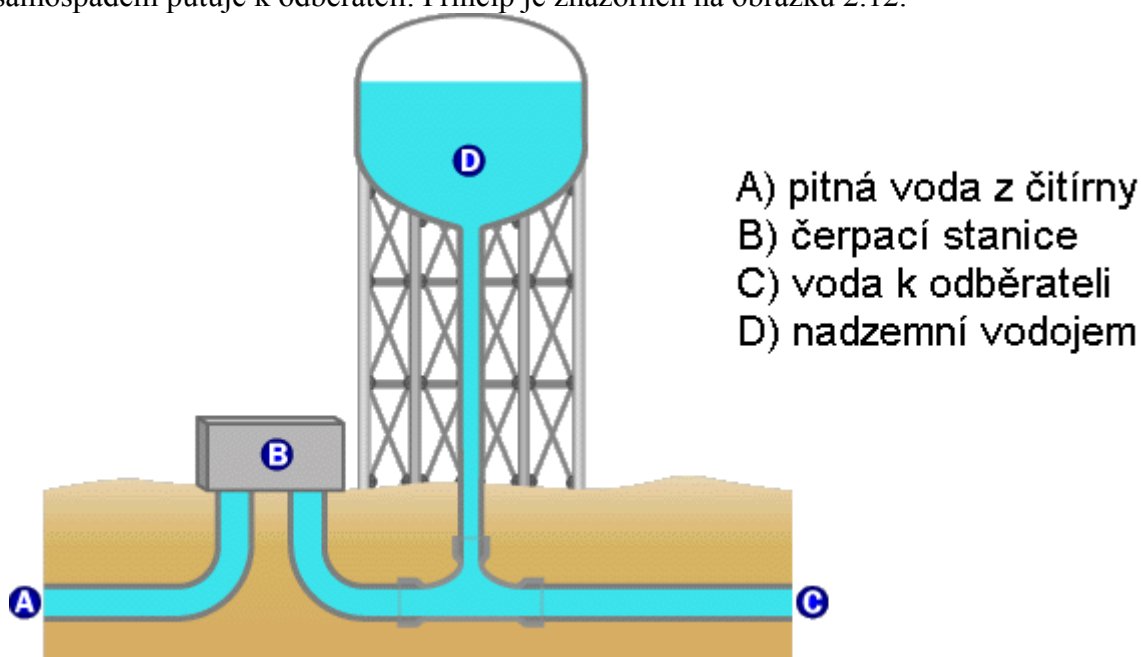


Obr. 2.11: Víceválcové nádrže

### 2.3.4. Ocelové nadzemní vodojemy

Nadzemní vodojemy jsou neuvěřitelně jednoduchá zařízení. Objevují se v různých tvarech a velikostech. Vodojem se staví na sloupech, jedná-li se o menší objem, stačí jeden centrální sloup. Sloup musí být dostatečně vysoký, aby vodojem vytvořil dostatečný tlak vody, která je dodávána do domácností a firem. Proto jsou také stavěny na vyvýšených místech [7].

Vodojemy fungují tak, že do vlastní nádrže je čerpána pomocí čerpadel voda, a ta pak samospádem putuje k odběrateli. Princip je znázorněn na obrázku 2.12.



Obr. 2.12 Princip fungování vodojemu[8]

Vlastní nádrž je tvořena skořepinou kulového tvaru. Hlavním napjatost je prosté membránové napětí. Tím je dosaženo poměrně malé tloušť stěny pláště. V místě napojení pláště ke sloupu je skořepina vyztužena dostatečně tuhými žebry [1].

### 3. Legislativa

Zákon č. 22/1997 Sb. Zákon o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů. Ten stanovuje základní pravidla bezpečnosti technických výrobků uváděných na trh v zemích Evropské unie. Definuje harmonizované normy, splněním požadavků harmonizovaných norem se považuje výrobek ve smyslu tohoto zákona za bezpečný.

Nařízení vlády č. 190/2002 Sb. v posledním znění, kterým se stanoví technické požadavky na stavební výrobky označované CE.

#### 3.1. Normy používané v ČR:

**EN 14015 Požadavky na navrhování a výrobu na místě zhotovených nadzemních vertikálních válcových nádrží s plochým dnem na skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší teplotě.**

Předmětem této evropské normy je specifikovat požadavky na materiál, výrobu, montáž, zkoušení a kontrolu ocelových svařovaných vertikálních válcových nádrží s plochým dnem, zhotovených na staveništi. Platí pro nadzemní nádrže na skladování kapaliny při teplotě okolí a vyšší. Návrhová teplota kapaliny musí být v rozmezí -40 až 300°C. Návrhový tlak nesmí být vyšší, jak 500mbar a návrhový podtlak nesmí být vyšší, jak 20mbar. Norma je platná pro státy Evropské unie [3].

**ČSN 69 8119-1 Nadzemní svařované ocelové nádrže s plochým dnem pro skladování ropy a kapalných ropných produktů - Část 1: Technické požadavky.**

Norma stanovuje základní požadavky na volbu materiálu, výpočet pevnosti, konstrukci, výstroj, výrobu, montáž, zkoušení, přejímání a dokumentaci pro nadzemní ocelové svařované velkoobjemové nádrže s plochým dnem. Nádrže mohou být uzavřené i otevřené, s vnitřním přetlakem blízký atmosférickému. Norma neplatí pro nádrže provozované v chladném režimu, nebo pro nádrže s médiem o teplotě vyšší, jak 250°C [9].

**EN 1993-4-2 Navrhování ocelových konstrukcí - Část 4-2: Zásobníky, nádrže a potrubí - Nádrže**

Obsahem normy jsou pravidla pro navrhování konstrukcí ocelových nádrží při mezních stavech únosnosti i mezních stavech použitelnosti. Návrhové postupy a hodnoty jsou dány pro válcové nebo pravoúhlé komory nádrží, pro kuželové výpusti, střechy a okapové spoje [10].

#### 3.2. Normy používané ve světě:

**API Standard 650 Svařované ocelové nádrže pro skladování ropy**

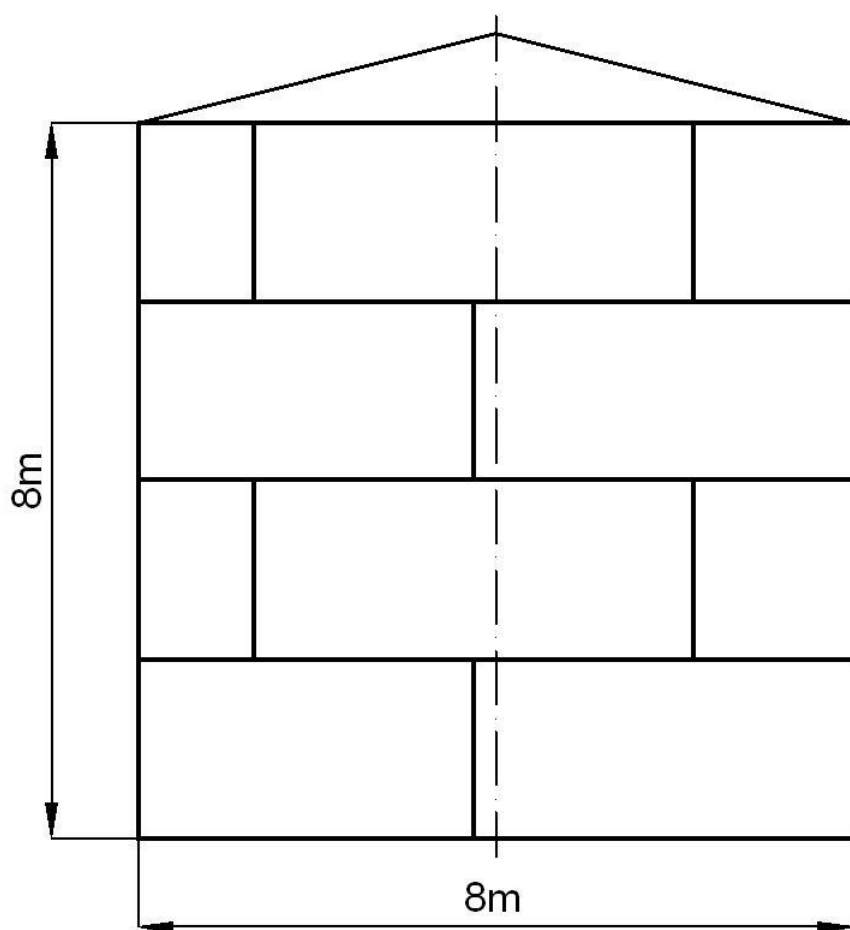
Norma stanovuje minimální požadavky na materiál, konstrukci, výrobu, montáž a kontrolu svařovaných vertikálních válcových nádrží o různých velikostech s otevřenou nebo uzavřenou střechou, s vnitřním přetlakem blízký atmosférickému tlaku. Vyšší tlaky jsou povoleny v případě splnění dalších požadavků. Norma platí pouze pro nádrže s rovnoměrně podepřeným dnem. Návrhová teplota nesmí překročit 93°C (200°F) [11].

## 4. Zadání uskladňovací nádrže

Navrhněte jednoplášťovou nádrž s pevnou střechou pro uskladnění petroleje. Hlavní rozměry dle obrázku 4.1

Jmenovitý objem nádrže:	400 m <sup>3</sup>
Výška pláště nádrže:	8 m
Průměr nádrže:	8 m
Přetlak na pojistném ventilu:	30 mbar
Podtlak na pojistném ventilu:	3 mbar
Skladovaná kapalina (hustota):	petrolej (760-860 kg/m <sup>3</sup> )
Rychlost plnění:	400 m <sup>3</sup> /h

Materiál:	S235 J2G3	
Korozní přídavky:	Dno:	1mm
	Plášť:	1mm
	Střecha:	1mm
	Hrdla:	0mm



Obr. 4.1: Hlavní rozměry nádrže



## 5. Jednotlivé části uskladňovací nádrže

Cílem této kapitoly je provedení souhrnu hlavních částí řešené nádrže a jejich funkci. Všechny části byly navrženy v souladu s normou EN 14015 Požadavky na navrhování a výrobu na místě zhotovených nadzemních vertikálních válcových nádrží s plochým dnem na skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší teplotě.

### Dno nádrže

Dno nádrže je navrženo z plechu tloušťky 8mm. Protože se jedná o nádrž s průměrem pláště menší jak 12,5m, dno bude bez obvodového věnce. Na dno nádrže byl použit materiál S235 J2G3. Všechny plechy dna jsou spojeny přeplátovanými spoji a svařeny na horní straně pouze souvislým koutovým svarem. Minimální překrytí plátů plechů je 5-ti násobek tloušťky plechů dna. Dno je nutno před uvedením do provozu opatřit ochranným nátěrem.

### Plášť nádrže

Celý plášť nádrže bude z plechu tloušťky 5mm. Na plášť nádrže byl použit materiál S235 J2G3. Při výpočtu byl zadán přídavek na korozi 1mm, plášť je nutno opatřit ochranným nátěrem. Pláty plechů pláště jsou spojeny vertikálními a horizontálními tupými svary. Plášť je odolný proti zborcení od zatížení větrem. Nebylo nutno použít výztužné sekundární prstence. Plášť je příliš tenký na to, aby na něj bylo přímo přichyceno schodiště. Kvůli tomu bude muset být přístup k otvorům řešen externí ocelovou konstrukcí se schodištěm nebo žebříkem.

### Střecha nádrže

Jedná se o samonosnou skořepinovou střechu bez ocelové konstrukce. Je vyrobena z plechu tloušťky 5mm. Střechu je nutno oboustranně opatřit ochranným nátěrem. Na střeše je umístěn střešní průlez, dvě odvětrávací hrdla a vzorkovací hrdlo. Přejechod mezi střechou a pláštěm je vyztužen profilem L 100x100x10, který je přivařen po celém obvodu pláště nádrže.

### Vstupní a výstupní hrdla

Vstupní a výstupní hrdla byla navržena tak, že požadovaná rychlost plnění nádrže je  $400 \text{ m}^3/\text{h}$ . Rychlost proudění petroleje v potrubí DN 200 bude tedy 3,75m/s. Nádrže budou plněny a vyprazdňovány čerpadlem o dostatečném výkonu.

### Boční průlez

Slouží ke vstupu obsluhy při inspekci, čištění a opravách nádrže. Dle normy EN 14015 byly dodrženy minimální rozměry průlezu dle článku 13.1.3.

### Dveře na čištění výplachem

Dveře na čištění výplachem byly navrženy dle Přílohy O, normy EN 14015.

### Odkalovací hrdlo

Slouží pro odvod kalů, které se během provozu nádrže shromáždí na dně nádrže. Odkalovací hrdlo je zaústěné do odkalovací, umístěné v nejnižším bodě nádrže.

### Střešní průlez

Slouží pro kontrolu vnitřního prostoru nádrže kdykoliv během provozu. Rozměry byly navrženy v souladu s článkem 13.3.1 EN 14015.

## **Odvzdušnění**

„Nádrže s pevnou střechou musí být s ohledem na pohyb média v nádrži, teplotní efekty a eventuální zavzdušnění opatřeny odvzdušňovacími hrdly ve střechě o odpovídajícím počtu a velikosti[12].“

Pro danou nádrž postačují dvě odvzdušňovací hrdla.

## **Vzorkovací hrdlo**

Slouží pro odběr vzorků pro kontrolu uskladněného média. Pro danou nádrž postačuje jedno hrdlo.

## 6. Návrh a pevnostní kontrola nádrže dle EN 14 015, návrh a pevnostní kontrola příruby a víka dle EN 13 445

### 6.1. Zadání

Jmenovitý objem nádrže:	400 m <sup>3</sup>
Výška nádrže:	8 m
Průměr nádrže:	8 m
Maximální výška hladiny v nádrži:	7,97m
Výška jednotlivých vrstev lubů:	vše 2m
Provozní tlak:	hydrostatický tlak + přetlak nebo podtlak
Přetlak na pojistném ventilu:	30 mbar
Podtlak na pojistném ventilu:	3 mbar
Skladovaná kapalina (hustota):	letecký petrolej (860 kg/m <sup>3</sup> )
Zkušební tlak:	hydrostatický + zkušební přetlak
Zkušební přetlak:	33mbar
Zkušební kapalina (hustota):	voda (1000 kg/m <sup>3</sup> )
Korozní přídavky:	Dno: 1mm
	Plášť: 1mm
	Střecha: 1mm
	Hrdla: 0mm

### 6.2. Materiál

Dno, plášť, střechu a kotvy:

Dle EN normy:	S235 J2G3
Mez kluzu:	$R_e = 235\text{MPa}$
Mez pevnosti:	$R_m = 340\text{MPa}$

Hrdla:

Dle EN normy:	S235 JRG2
Mez kluzu:	$R_e = 235\text{MPa}$
Mez pevnosti:	$R_m = 340\text{MPa}$

Příruby:

Dle EN normy:	S275 JRG2
Mez kluzu:	$R_e = 265\text{MPa}$
Mez pevnosti:	$R_m = 410\text{MPa}$

### 6.3. Návrhové zatížení

Hydrostatické zatížení kapalinou během provozu  
Hydrostatické zatížení kapalinou během těsnicí zkoušky  
Zatížení vlastní vahou  
Zatížení sněhem  
Zatížení větrem  
Seizmické zatížení  
Kombinace zatížení

### 6.4. Dovolená napětí

Dovolené návrhové napětí

$$S = \min\left(\frac{2}{3} \cdot R_e; 260\right) \quad (6.1)$$

$$S = 156,667 \text{ MPa}$$

Dovolené zkušební napětí

$$S_t = \min(0,75 \cdot R_e; 260) \quad (6.2)$$

$$S_t = 176,25 \text{ MPa}$$

## 5. Dno nádrže

Nádrž je navržena s jednoduchým dnem. Průměr dna nádrže je menší jak 12,5m, nebude použit plechový obvodový věnec.

Tab. 6.1: Minimální jmenovitá hloubka dna

Materiál	Pro přeplátované svary dna	Pro tupé svary dna
C a CMn oceli	6 mm	5 mm
Nerezové oceli	5 mm	3 mm

Materiál patří do skupiny uhlíkových ocelí, dno bude svařeno přeplátovanými svary (pozn. nebyl požadavek na tupé svary, dle EN 14 015 budou tedy použity svary přeplátované). Minimální hloubka dna dle tabulky 6.1 je uvažována již ve zkorodovaném stavu. Bude připočten přídavek na korozi  $c_{\text{dna}} = 1 \text{ mm}$ .

$$e_b = e_{b,\text{min}} + c_{\text{dna}}$$

$$e_b = 6 + 1 \quad (6.3)$$

$$e_b = 7 \text{ mm}$$

Na dno nádrže bude zvolen plech o tloušťce 8mm.

## 6.6. Plášť nádrže

Tab. 6.2: Tabulka použitých veličin a symbolů pro výpočet pláště

symbol	popis	jednotka
c	přídavek na korozi	mm
D	průměr nádrže	m
e	Hloubka stěny jednotlivých lubů ( v korozních podmínkách, pokud se dá použít)	mm
$e_c$	tloušťka stěny pláště při návrhových podmínkách	mm
$e_{min}$	Hloubka stěny horního lubu (v korozních podmínkách, pokud se dá použít)	mm
$e_t$	tloušťka stěny pláště při zkušebních podmínkách	mm
h	Výška jednotlivých lubů	m
$H_c$	výška hladiny kapaliny	m
$H_e$	Ekvivalentní stabilní výška každé části při $e_{min}$	m
$H_E$	Ekvivalentní stabilní úplná výška pláště při $e_{min}$	m
$H_p$	Maximální dovolený rozestup sekundárních výstužných prstenců na plášti s minimální tloušťkou	m
K	Součinitel	-
p	návrhový tlak	mbar
$p_t$	zkušební tlak	mbar
$p_v$	Návrhový vnitřní podtlak	mbar
S	dovolené návrhové napětí	MPa
$S_t$	dovolené zkušební napětí	MPa
$V_w$	Nárazová rychlost větru, minimálně ale 45m/s	m/s
W	maximální návrhová hustota plně kapaliny při skladovacích podmínkách	kg/l
$W_t$	maximální návrhová hustota zkušební kapaliny	kg/l

Zadané hodnoty:

$$c = 1\text{mm}$$

$$D = 8\text{m}$$

$$H_{c1,2,3,4} = 2\text{m}; 4\text{m}; 6\text{m}; 8\text{m}$$

$$p = 30\text{mbar}$$

$$p_t = 33\text{mbar}$$

$$p_v = 3\text{mbar}$$

$$V_w = 45\text{m/s (rychlost větru v dané lokalitě 25m/s)}$$

$$W = 0,86\text{kg/l}$$

$$W_t = 1\text{kg/l}$$

Výpočet:

Výpočet minimální tloušťky stěny jednotlivých lubů při provozu

$$e_c = \frac{D}{20 \cdot S} \cdot [98 \cdot W(H_c - 0,3) + p] + c \quad (6.4)$$

Výpočet minimální tloušťky stěny jednotlivých lubů při tlakové zkoušce do tabulky 6.3

$$e_t = \frac{D}{20 \cdot S_t} \cdot [98 \cdot W_t(H_c - 0,3) + p_t] \quad (6.5)$$

Tab. 6.3: Tabulka vypočtených tlouštěk plechů jednotlivých lubů

Číslo lubu	Materiál	Výška lubu [m]	Výška řezu [m]	Výška hladiny [m]	Dovolené namáhání		Vypočtená tloušťka		Navržená tloušťka [mm]
					Provoz [MPa]	Zkouška [MPa]	Provoz [mm]	Zkouška [mm]	
4	S235J2G3	2	6	2	156,67	176,25	1,44	0,45	5
3	S235J2G3	2	4	4	156,67	176,25	1,87	0,9	5
2	S235J2G3	2	2	6	156,67	176,25	2,3	1,34	5
1	S235J2G3	2	0	8	156,67	176,25	2,73	1,79	5

Stanovení tloušťky plechů jednotlivých lubů provedeme zaokrouhlením výsledků hodnot na nejbližší vyšší vyráběnou tloušťku plechu. Je nutno ale dodržet minimální tloušťku plechu dle tabulky 6.4.

Tab. 6.4: Minimální stanovená tloušťka pláště

Průměr nádrže D [m]	Minimální stanovená tloušťka pláště e	
	C a CMn oceli [mm]	Nerezové oceli [mm]
$4 < D$	5	2
$4 \leq D < 10$	5	3
$10 \leq D < 15$	5	4
$15 \leq D < 30$	6	5
$30 \leq D < 45$	8	6
$45 \leq D < 60$	8	-
$60 \leq D < 90$	10	-
$90 \leq D$	12	-
Pro pláště z nerezové oceli o průměru $\geq 45\text{m}$ musí být minimální tloušťka předmětem dohody		

Sekundární prstenec

Ekvivalentní stabilní výška každé části při  $e_{\min}$

$$H_e = h \cdot \left( \frac{e_{\min}}{e} \right)^{2,5} \quad (6.6)$$

Ekvivalentní stabilní úplná výška pláště při  $e_{\min}$  viz. tabulka 6.5

$$H_E = \sum H_e \quad (6.7)$$

Tab. 6.5: Výpočet ekvivalentní výšky

Prstenec	h [m]	e [mm]	$H_e$ [m]
4	2	5	2
3	2	5	2
2	2	5	2
1	2	5	2
$H_E =$			8

Součinitel

$$K = \frac{95000}{3,563 \cdot V_w^2 + 580 \cdot p_v} \quad (6.8)$$

$$K = 10,609$$

Maximální dovolený rozestup sekundárních výstužných prstenců na plášti s minimální tloušťkou

$$H_p = K \cdot \sqrt{\frac{e_{\min}^5}{D^3}} \quad (6.9)$$

$$H_p = 26,209 \text{ m}$$

Výška nádrže  $H < H_p$ , nebude potřeba žádný výstužný prstenec

## 6.7. Pevná střecha

Tab. 6.6: Tabulka použitých veličin a symbolů pro výpočet pevné střechy

symbol	popis	jednotka
A	tlaková plocha	mm <sup>2</sup>
e <sub>p</sub>	Tloušťka plechu střechy bez korozního přídávku	mm
E	Modul pružnosti v tahu	N/mm <sup>2</sup>
J	Součinitel únosnosti svarového spoje	-
p	Návrhový tlak	mbar
p <sub>c</sub>	Vnitřní tlak rovnající se návrhovému tlaku <b>p</b> minus hmotnost plechů střechy	mbar
p <sub>e</sub>	Vnější zátěž + vlastní hmotnost + návrhový vnitřní podtlak	kPa
p <sub>m</sub>	Tlak od vlastní hmotnosti střechy (plechy střechy, hrdla)	kPa
p <sub>s</sub>	Tlakové zatížení sněhem	kPa
p <sub>v</sub>	Návrhový vnitřní podtlak	kPa
R	Poloměr nádrže	m
R <sub>1</sub>	Poloměr zaoblení střechy (pro kuželové střechy $R_1 = R/\sin\theta$ )	m
S	Dovolené návrhové napětí	N/mm <sup>2</sup>
S <sub>c</sub>	Dovolené napětí v tlaku, které musí být pro všechny oceli 120N/mm <sup>2</sup> pokud není stanoveno jinak	N/mm <sup>2</sup>
θ	Úhel mezi meridiánem střechy a rovinou střechy na spoji	-

Zadané hodnoty:

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$J = 0,35$$

$$p = 30 \text{ mbar}$$

$$p_m = 0,634 \text{ kPa}$$

$$p_s = 2 \text{ kPa}$$

$$p_v = 0,3 \text{ kPa}$$



$$\theta = 12^\circ$$

Výpočet:

Vnější zátěž + vlastní hmotnost + návrhový vnitřní podtlak

$$p_e = p_m + p_s + p_v$$

$$p_e = 2,934 \text{ kPa} \quad (6.10)$$

Poloměr zaoblení střechy

$$R_1 = \frac{R}{\sin \theta}$$

$$R_1 = 19,24 \text{ m} \quad (6.11)$$

Minimální tloušťka pláště při přetlaku:

$$e_p = \frac{p \cdot R_1}{10 \cdot S \cdot J}$$

$$e_p = 1,053 \text{ mm} \quad (6.12)$$

Minimální tloušťka pláště při podtlaku:

$$e_p = 40 \cdot R_1 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot p_e}{E}}$$

$$e_p = 2,948 \text{ mm} \quad (6.13)$$

Pro střechu bude zvolen plech tloušťky 5mm.

Vnitřní tlak rovnající se návrhovému tlaku  $p$  minus hmotnost plechů střechy

$$p_c = p - 10 \cdot p_m$$

$$p_c = 23,66 \text{ mbar} \quad (6.14)$$

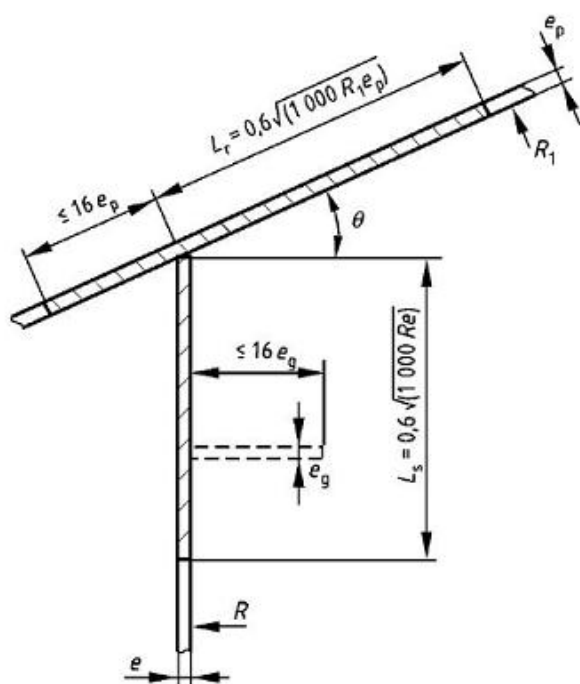
Minimální tlaková plocha na spoji pláště a střechy

$$A = \frac{50 \cdot p_c \cdot R^2}{S_c \cdot \tan \theta}$$

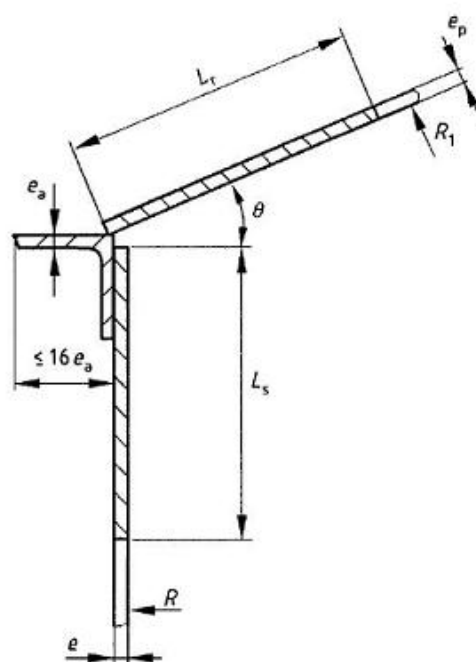
$$A = 741,99 \text{ mm}^2 \quad (6.15)$$

Ze dvou variant, viz obr. 6.1 bude použita varianta b), protože profil výstužného prstence nám bude sloužit i jako plocha pro případné přivaření externí pochůzné plošiny.

Bude zvolen výstužný prstenec z profilu L 100x100x10, který i po zkorodování 1mm tloušťky bude mít dostatečný průřez, aby zlom mezi střechou a pláštěm udržel.



a) Bez rohového prstence



b) S rohovým prstencem

Obr.6.1: Typické tlakové plochy na spoji plášť-střecha [4]

## 6.8. Hrdla

Tab. 6.7 Tabulka použitých veličin a symbolů pro kontrolu hrdla

symbol	popis	jednotka
$A_a$	Součet všech ploch, podílejících se na vyztužení hrdla	$\text{mm}^2$
$A_n$	Účinný průřez vyztužení k dispozici od hrdla ven z pláště	$\text{mm}^2$
$A_{ni}$	Účinný průřez vyztužení k dispozici od hrdla uvnitř pláště	$\text{mm}^2$
$A_p$	Účinný průřez výztuže k dispozici z výztužného límce hrdla	$\text{mm}^2$
$A_r$	Plocha průřezu vyztužení	$\text{mm}^2$
$A_s$	Účinný průřez vyztužení k dispozici ze stěny pláště	$\text{mm}^2$
$c$	Přídavek na korozi hrdla	mm
$d$	Průměr otvoru řezu ve stěně pláště	mm
$d_e$	Efektivní průměr výztužného plechu	mm
$d_n$	Vnější průměr hrdla	mm
$e_l$	Požadovaná minimální tloušťka plechu pláště	mm
$e_n$	Minimální tloušťka hrdla	mm
$e_s$	Minimální tloušťka plechu pláště	mm
$e_p$	Minimální tloušťka výztužného plechu	mm
$l_n$	Délka hrdla vně pláště	mm
$l_{ni}$	Délka hrdla uvnitř pláště	mm

Pro kontrolu hrdel pláště bude použita metoda náhradní ploch. Minimální plocha průřezu vyztužení musí být menší, jako suma všech ploch podílejících se na vyztužení otvoru pro hrdlo

### Boční průřez

Zadané hodnoty:

$$c = 0\text{mm}$$

$$d = 670\text{mm}$$

$$d_e = 1250\text{mm}$$

$$d_n = 660\text{mm}$$

$$e_l = 2,7\text{mm}$$

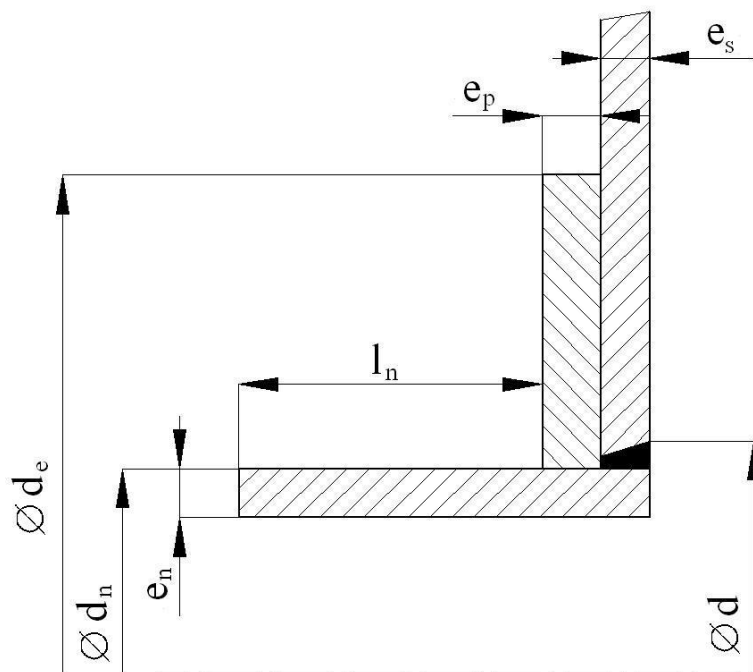
$$e_n = 12,5\text{mm}$$

$$e_p = 6 - 0,5 = 5,5\text{mm} \text{ odečítáme } 1/2 \text{ přídavku na korozi pláště}$$

$$e_s = 5 - 0,5 = 4,5\text{mm} \text{ odečítáme } 1/2 \text{ přídavku na korozi pláště}$$

$$l_n = 269\text{mm}$$

$$l_{ni} = 0$$



Obr. 6.2: Rozměry hrdla

Výpočet:

Plocha průřezu vyztužení

$$A_r = 0,75 \cdot d \cdot e_1$$

$$A_r = 1356,75 \text{ mm}^2 \quad (6.16)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici ze stěny pláště

$$A_s = (2 \cdot d - d) \cdot (e_s - e_1)$$

$$A_s = 1206 \text{ mm}^2 \quad (6.17)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici z vyztužného límce hrdla

$$A_p = (\min(d_e, 2 \cdot d) - d_n) \cdot e_p$$

$$A_p = 3245 \text{ mm}^2 \quad (6.18)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici od hrdla ven z pláště

$$A_n = (e_s + \min(l_n, 4 \cdot e_n)) \cdot (e_n - c)$$

$$A_n = 681,25 \text{ mm}^2 \quad (6.19)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici od hrdla uvnitř pláště

$$A_{ni} = \min(l_{ni}, 4 \cdot e_n) \cdot (e_n - c)$$

$$A_{ni} = 0 \text{ mm}^2 \quad (6.20)$$

Součet všech ploch, podílejících se na vyztužení hrdla

$$A_a = A_s + A_p + A_n + A_{ni} \\ A_a = 5132,25\text{mm}^2 \quad (6.21)$$

Musí platit:

$$A_a > A_r \\ 5132,25\text{mm}^2 > 1356,25\text{mm}^2 \quad \textbf{vyhovuje}$$

## Vstupní a výstupní hrdlo

Obě hrdla mají stejné rozměry, proto bude proveden jedním výpočet, platný pro obě hrdla.

Zadané hodnoty:

$$\begin{aligned} c &= 0\text{mm} \\ d &= 228\text{mm} \\ d_e &= 400\text{mm} \\ d_n &= 219,1\text{mm} \\ e_1 &= 2,7\text{mm} \\ e_n &= 12,5\text{mm} \\ e_p &= 6 - 0,5 = 5,5\text{mm} \text{ odečítáme } 1/2 \text{ přídatku na korozi pláště} \\ e_s &= 5 - 0,5 = 4,5\text{mm} \text{ odečítáme } 1/2 \text{ přídatku na korozi pláště} \\ l_n &= 189\text{mm} \\ l_{ni} &= 0 \end{aligned}$$

Výpočet:

Plocha průřezu vyztužení

$$A_r = 0,75 \cdot d \cdot e_1 \\ A_r = 461,7\text{mm}^2 \quad (6.22)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici ze stěny pláště

$$A_s = (2 \cdot d - d_n) \cdot (e_s - e_1) \\ A_s = 410,4\text{mm}^2 \quad (6.23)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici z vyztužného límce hrdla

$$A_p = (\min(d_e, 2 \cdot d) - d_n) \cdot e_p \\ A_p = 994,95\text{mm}^2 \quad (6.24)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici od hrdla ven z pláště

$$A_n = (e_s + \min(l_n, 4 \cdot e_n)) \cdot (e_n - c) \\ A_n = 681,25\text{mm}^2 \quad (6.25)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici od hrdla uvnitř pláště

$$A_{ni} = \min(l_{ni}, 4 \cdot e_n) \cdot (e_n - c) \quad (6.26)$$

$$A_{ni} = 0 \text{ mm}^2$$

Součet všech ploch, podílejících se na vyztužení hrdla

$$A_a = A_s + A_p + A_n + A_{ni} \quad (6.27)$$

$$A_a = 2086,6 \text{ mm}^2$$

Musí platit:

$$A_a > A_r$$

$$2086,6 \text{ mm}^2 > 461,7 \text{ mm}^2$$

**vyhovuje**

Dveře pro čištění vyplachováním

Zadané hodnoty:

$$c = 0 \text{ mm}$$

$$d = 315 \text{ mm}$$

$$d_e = 450 \text{ mm}$$

$$d_n = 312,5 \text{ mm}$$

$$e_l = 2,7 \text{ mm}$$

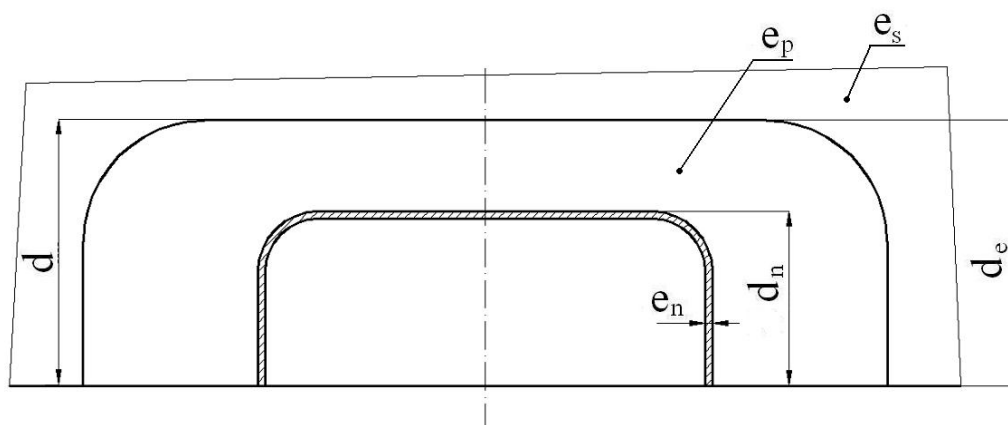
$$e_n = 12,5 \text{ mm}$$

$$e_p = 6 - 0,5 = 5,5 \text{ mm} \text{ odečítáme } 1/2 \text{ přídavku na korozi pláště}$$

$$e_s = 5 - 0,5 = 4,5 \text{ mm} \text{ odečítáme } 1/2 \text{ přídavku na korozi pláště}$$

$$l_n = 127 \text{ mm}$$

$$l_{ni} = 0$$



Obr.6.3: Rozměry dveří pro čištění vyplachováním

Výpočet:

Plocha průřezu vyztužení

$$A_r = 0,75 \cdot d \cdot e_l$$

$$A_r = 637,875 \text{ mm}^2$$

(6.28)

Účinný průřez vyztužení k dispozici ze stěny pláště

$$A_s = (2 \cdot d - d) \cdot (e_s - e_1)$$
$$A_s = 567 \text{ mm}^2 \quad (6.29)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici z výztužného límce hrdla

$$A_p = (\min(d_e, 2 \cdot d) - d_n) \cdot e_p$$
$$A_p = 756,25 \text{ mm}^2 \quad (6.30)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici od hrdla ven z pláště

$$A_n = (e_s + \min(l_n, 4 \cdot e_n)) \cdot (e_n - c)$$
$$A_n = 681,25 \text{ mm}^2 \quad (6.31)$$

Účinný průřez vyztužení k dispozici od hrdla uvnitř pláště

$$A_{ni} = \min(l_{ni}, 4 \cdot e_n) \cdot (e_n - c)$$
$$A_{ni} = 0 \text{ mm}^2 \quad (6.32)$$

Součet všech ploch, podílejících se na vyztužení hrdla

$$A_a = A_s + A_p + A_n + A_{ni}$$
$$A_a = 2004,5 \text{ mm}^2 \quad (6.33)$$

Musí platit:

$$A_a > A_r$$

$$2004,5 \text{ mm}^2 > 637,875 \text{ mm}^2$$

**vyhovuje**

## 6.9. Kontrola uskladňovací nádrže na seizmické zatížení

Tab. 6.8 Tabulka použitých veličin a symbolů pro kontrolu uskladňovací nádrže na seizmické zatížení

symbol	popis	jednotka
$a_s$	Seizmické zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
D	Průměr nádrže	m
$F_a$	Maximální dovolené podélné napětí, zohledňuje účinek vnitřního tlaku na obsah kapaliny	MPa
$G_1$	Koeficient boční síly uváděný jako poměr seizmického zrychlení a gravitačního zrychlení	-
$G_2$	Koeficient boční síly uváděný jako poměr seizmického zrychlení a gravitačního zrychlení stanovený dle vztahu (6.36)	-
$H_L$	Celková výška nádrže	m
$H_T$	Maximální výška plnění nádrže	m
j	Koeficient zpevnění stanoviště	-
$K_s$	Koeficient z graf 3	-
M	Moment převrácení působící na dno pláště nádrže	N/m
$R_{eb}$	Minimální specifikovaná mez kluzu plechu dna pod pláštěm	MPa
$R_{es}$	Minimální specifikovaná mez kluzu plechu vrstvy dna pláště	MPa
$t_{ba}$	Tloušťka plechu dna pod pláštěm	mm
$t_{bs}$	Tloušťka plechu nejspodnějšího lubu bez přídavku na korozi	mm
$T_1$	Efektivní hmotnost obsahu nádrže, která se pohybuje v souladu s pláštěm nádrže a je stanovena dle grafu 1	kg
$T_2$	Efektivní hmotnost nádrže, která se pohybuje v prvním módu šplíchání a je stanovena dle grafu 2	kg
$T_r$	Celková hmotnost střechy nádrže (pevné a plavací) + zatížení sněhem	kg
$T_s$	Čas prvního módu přirozeného šplíchání	-
$T_t$	Celková hmotnost pláště nádrže	kg
$T_T$	Celková hmotnost obsahu nádrže (založena na hustotě uskladňovací kapaliny, není menší jak 1 kg/l)	kg
$W_b$	Maximální zatěžující síla na dno pláště	kN/m
$W_L$	Maximální síla obsahu nádrže, kterou můžeme využít na to, aby plášť vydržel moment převrácení	kN/m
$W_t$	Maximální síla, kterou působí plášť nádrže a část střechy podepřené pláštěm	kN/m
$W_s$	Maximální hustota kapaliny v nádrži při podmínkách skladování, která nesmí být menší, jak 1 kg/l	kg/l
$X_1$	Výška dna pláště nádrže k těžišti boční seizmické síly působící na $T_1$ , která je stanovena dle grafu 2	m
$X_2$	Výška dna pláště nádrže k těžišti boční seizmické síly působící na $T_2$ , která je stanovena dle grafu 2	m
$X_s$	Výška od dna pláště nádrže do středu těžiště pláště	m



Zadané hodnoty:

$$a_s = 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$D = 8 \text{ m}$$

$$H_L = 8 \text{ m}$$

$$H_T = 7,98 \text{ m}$$

$$j = 1,2$$

$$R_{eb} = R_{es} = 235 \text{ MPa}$$

$$t_{ba} = 5 \text{ mm}$$

$$t_{bs} = 4 \text{ mm}$$

$$T_r = 13497,805 \text{ kg}$$

$$T_t = 8192 \text{ kg}$$

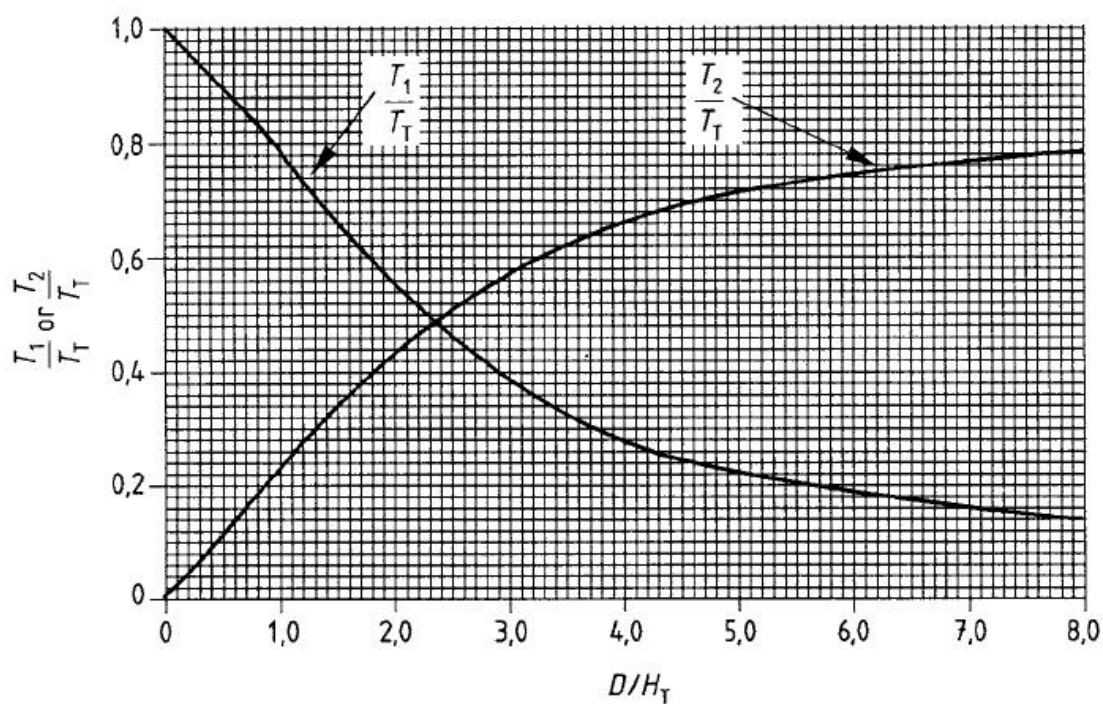
$$T_T = 400000 \text{ kg}$$

$$W_t = 5 \text{ kN/m}$$

$$X_s = 4 \text{ m}$$

Výpočet:

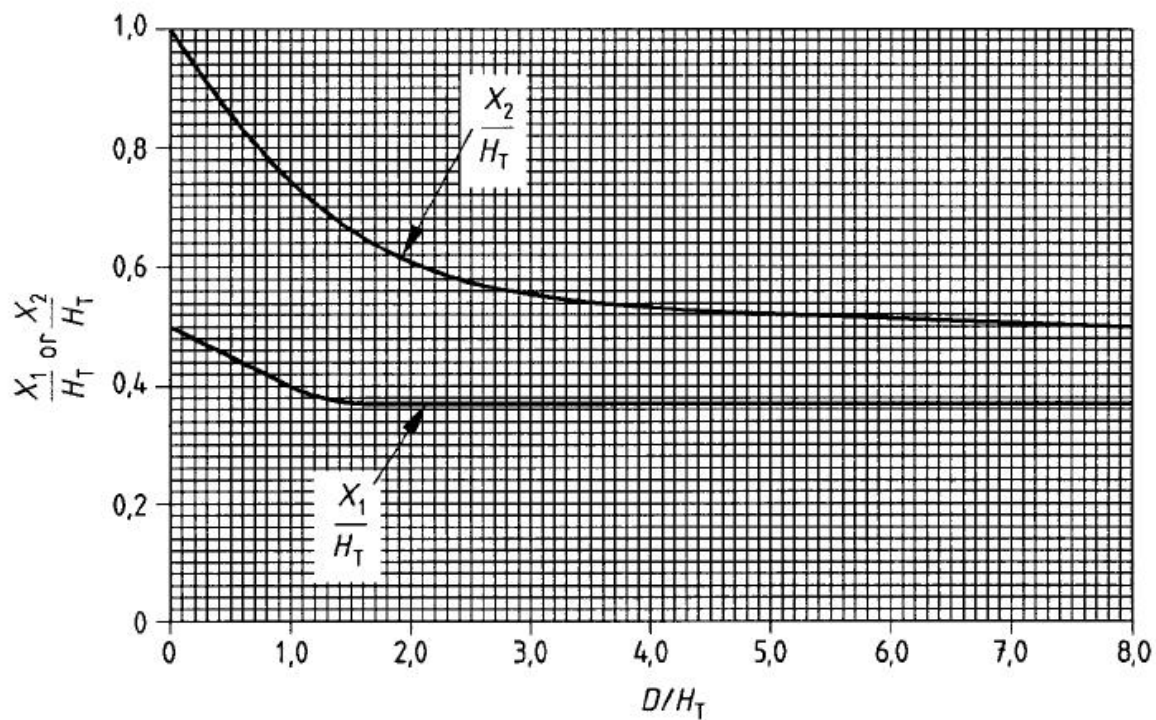
Stanovení efektivních hmotností  $T_1$  a  $T_2$  dle graf 6.1:



Graf 6.1: Efektivní hmotnosti uskladněné kapaliny[4]

Po odečtení z grafu byly stanoveny hodnoty  $T_1 = 255360$  a  $T_2 = 73920$

Stanovení zatížení seismické síly  $X_1$  a  $X_2$  dle graf 6.2:



Graf 6.2: Zatížení seismické síly[4]

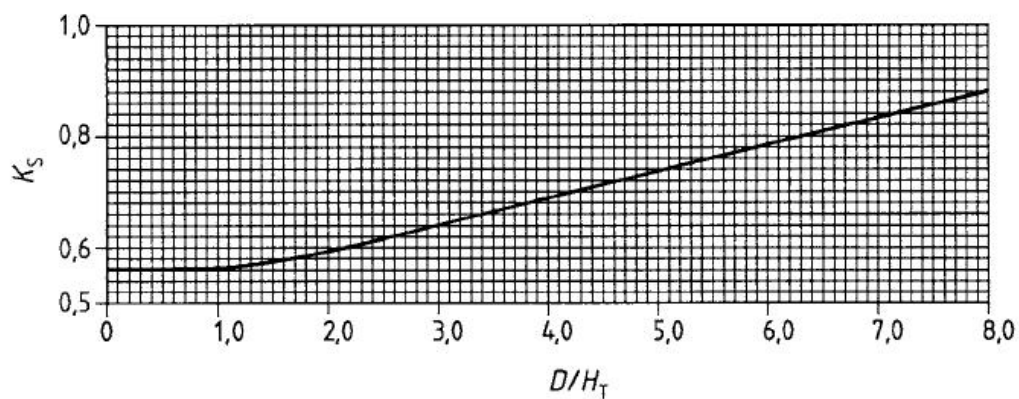
Po odečtení z grafu byly stanoveny hodnoty  $X_1 = 3,12$  a  $X_2 = 5,76$

Koeficient boční síly  $G_1$

$$G_1 = \frac{a_s}{g} \quad (6.34)$$

$$G_1 = 0,031$$

Koeficient  $K_s$  stanovujeme z graf. 3



Graf 6.3: Koeficient  $K_s$  [4]

Po odečtení z graf. 3 je určen  $K_s = 0,56$

Čas prvního módu šplíchání stanovíme:

$$T_s = 1,8 \cdot K_s \cdot D^{0,5}$$

$$T_s = 2,851 \quad (6.35)$$

Koeficient boční síly  $G_2$ :

Pokud je  $T_s \leq 4,5$ , pak  $G_2 = \frac{1,25 \cdot G_1 \cdot j}{T_s}$

Pokud je  $T_s > 4,5$ , pak  $G_2 = \frac{5,625 \cdot G_1 \cdot j}{T_s^2}$

$2,851 \leq 4,5$ , proto  $G_2$  vypočteme jako:

$$G_2 = 0,016 \quad (6.36)$$

Moment převrácení:

$$M = \frac{G_1 \cdot (T_t \cdot X_s + T_r \cdot H_L + T_l \cdot X_l) + G_2 \cdot T_2 \cdot X_2}{102} \quad (6.37)$$

$$M = 406,52 \text{ N/m}$$

Odolnost proti převrácení:

$$W_L = 0,1 \cdot t_{ba} \cdot \sqrt{R_{eb} \cdot W_s \cdot H_T} \quad (6.38)$$

$$W_L = 21,679 \text{ kN/m}$$

Musí platit:

$$W_L < 0,2 \cdot W_s \cdot H_T \cdot D \quad (6.39)$$

$$26,015 \text{ kN/m} < 12,8 \text{ kN/m}$$

**Není splněno**, nádrž musí být ukotvena, jinak by hrozilo její převrácení

Zatížení dna pláštěm:

$$W_b = W_t + \frac{1,273 \cdot M}{D^2} \quad (6.40)$$

$$W_b = 13,086 \text{ kN/m}$$

Maximální dovolené napětí v plášti

$$\frac{W_s \cdot H_T \cdot D^2}{t_{bs}^2} \geq 44 \quad F_a = 83 \cdot \frac{t_{bs}}{D}$$

$$\frac{W_s \cdot H_T \cdot D^2}{t_{bs}^2} < 44 \quad F_a = 33 \cdot \frac{t_{bs}}{D} + 7,5 \cdot \sqrt{W_s \cdot H_T}$$

$$\frac{W_s \cdot H_T \cdot D^2}{t_{bs}^2} = \frac{1 \cdot 8 \cdot 8^2}{4^2} = 32 \Rightarrow F_a = 37,713 \text{ MPa} \quad (6.41)$$

Musí platit, že  $F_a$  nesmí být větší jak  $0,5 \cdot R_{es}$

$$37,713 \text{ MPa} < 117,5 \text{ MPa}$$

**vyhovuje**

Zároveň musí platit, že  $F_a$  musí být větší jak maximální podélné napětí v plášti  $\frac{W_b}{t_{bs}}$

$$37,713\text{MPa} > 3,271\text{MPa}$$

**vyhovuje**

## 6.10. Kontrola kotevních šroubů

Tab. 6.9 Tabulka použitých veličin a symbolů pro kontrolu kotevních šroubů

symbol	popis	jednotka
$A_{\min}$	Minimální účinná plocha průřezu šroubu	$\text{mm}^2$
$d_{bl}$	Vnitřní průměr šroubu	mm
$D$	Průměr nádrže	m
$F_b$	Síla působící na jeden šroub	N
$n$	Počet šroubů	-
$R_{eb}$	Mez kluzu materiálu šroubu	MPa
$R_{mb}$	Mez pevnosti materiálu šroubu	MPa
$S_b$	Dovolené namáhání šroubu	MPa
$W_a$	Minimální odolnost kotvení	kN/m
$W_t$	Maximální síla, kterou působí plášť nádrže a část střechy podepřené pláštěm	kN/m
$\sigma_b$	Napětí působící na šroub	MPa

Zadané hodnoty:

$$d_{bl} = 25,653\text{mm}$$

$$D = 8\text{m}$$

$$n = 10$$

$$R_{eb} = 240\text{MPa}$$

$$R_{mb} = 400\text{MPa}$$

Výpočet:

Minimální odolnost kotvení

$$W_a = \left( \frac{1,273 \cdot M}{D^2} \right) - W_t \quad (6.42)$$

$$W_a = 2,014\text{kN/m}$$

Síla působící na jeden šroub

$$F_b = \frac{\pi \cdot D}{n} \cdot W_a \quad (6.43)$$

$$F_b = 5,0624 \text{ kN} = 5062,4 \text{ N}$$

Kotevní šrouby

$$S_b = \min\left(\frac{R_{eb}}{2}; \frac{R_{mb}}{3}\right) \quad (6.44)$$

$$S_b = 120 \text{ MPa}$$

Minimální účinná plocha průřezu šroubu

$$A_{\min} = \frac{\pi \cdot (d_{bl} - c_b)^2}{4} \quad (6.45)$$

$$A_{\min} = 439,4 \text{ mm}^2$$

Napětí působící na šroub:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_{\min}} \quad (6.46)$$

$$\sigma_b = 11,521 \text{ MPa}$$

Musí platit:

$$\sigma_b \leq S_b$$

$$11,521 \text{ MPa} \leq 120 \text{ MPa}$$

**vyhovuje**

## 6.11. Kontrola příruby bočního otvoru a jejího víka dle EN 13445

Tab. 6.10 Tabulka použitých veličin a symbolů pro kontrolu příruby a víka

symbol	popis	jednotka
A	Vnější průměr příruby	mm
$A_B$	Celková plocha průřezu šroubů v místě nejmenšího průměru	mm <sup>2</sup>
$A_{B,min}$	Celková požadovaná plocha průřezu šroubů	mm <sup>2</sup>
b	Účinná šířka těsnění nebo dosedací plochy	mm
$b_0$	Základní šířka těsnění nebo dosedací plochy	mm
B	Vnitřní průměr příruby	mm
C	Průměr roztečné kružnice šroubů	mm
$C_F$	Korekční součinitel rozteče šroubů	-
$d_b$	Vnější průměr šroubu	mm
e	Minimální tloušťka příruby	mm
$e_A$	Teoretická minimální tloušťka víka	mm
$e_p$	Teoretická minimální tloušťka víka	mm
$e_{p1}$	Teoretická minimální tloušťka okraje víka	mm
$e_v$	Minimální tloušťka víka	mm
$e_{v1}$	Minimální tloušťka okraje víka	mm
f	Dovolené namáhání materiálu příruby	MPa
$f_A$	Dovolené namáhání materiálu víka	MPa
$f_B$	Dovolené namáhání šroubů při provozní teplotě	MPa
$f_{B,A}$	Dovolené namáhání šroubů při montážní teplotě	MPa
$g_0$	Tloušťka krku u spoje s pláštěm	mm
$g_1$	Tloušťka krku u spoje s listem příruby	mm
G	Průměr reakční síly v těsnění	mm
$h_D$	Radiální vzdálenost od roztečné kružnice šroubů ke kružnici, na které působí $H_D$	mm
$h_G$	Radiální vzdálenost od reakční síly v těsnění k roztečné kružnici šroubů	mm
$h_T$	Radiální vzdálenost od roztečné kružnice šroubů ke kružnici, na které působí $H_T$	mm
H	Celková osová síla od tlaku	N
$H_D$	Osová síla přenášená přes plášť příruby	N
$H_G$	Tlaková síla na těsnění pro dosažení těsnosti	N
$H_T$	Osová síla od tlaku na čelní plochu příruby	N
k	Součinitel napětí	-

K	Poměr průměrů příruby	-
$l_0$	Parametr délky	mm
m	Součinitel těsnění	-
M	Krouticí moment působící na jednotku délky příruby	N
$M_A$	Celkový moment působící na přírubu ve smontovaném stavu	N · mm
$M_{op}$	Celkový moment působící na přírubu v provozním stavu	N · mm
n	Počet šroubů	-
P	Výpočtový tlak	MPa
$R_e$	Mez kluzu materiálu příruby a víka	MPa
$R_{eb}$	Mez kluzu materiálu šroubu	MPa
$R_m$	Mez pevnosti materiálu příruby a víka	MPa
$R_{mb}$	Mez pevnosti materiálu šroubu	MPa
w	Styková šířka těsnění omezená šířkou těsnění a těsnící plochy	mm
W	Výpočtové zatížení šroubů ve smontovaném stavu	N
$W_A$	Minimální požadované zatížení šroubů ve smontovaném stavu	N
$W_{op}$	Celkový moment působící na přírubu v provozním stavu	N
y	Minimální tlak na usazení těsnění nebo spoje	MPa
$\beta_F$	Součinitel pro výpočet integrálního typu příruby	-
$\beta_T$	Součinitel daný vzorcem 6.69	-
$\beta_U$	Součinitel daný vzorcem 6.70	-
$\beta_V$	Součinitel pro integrální metodu	-
$\beta_Y$	Součinitel daný vzorcem 6.71	-
$\delta_b$	Vzdálenost mezi středy sousedních šroubů	mm
$\lambda$	Součinitel daný vzorcem 7.72	-
$\nu$	Poissonova konstanta materiálu víka	-
$\sigma_H$	Podélné napětí v krku	MPa
$\sigma_r$	Radiální napětí v přírubě	MPa
$\sigma_\theta$	Tangenciální napětí v přírubě	MPa
$\varphi$	Korekční součinitel napětí v krku pro výpočet integrálních přírub	-

Zadané hodnoty:

$$A = 785\text{mm}$$

$$A_{BI} = 225,2\text{mm}^2$$

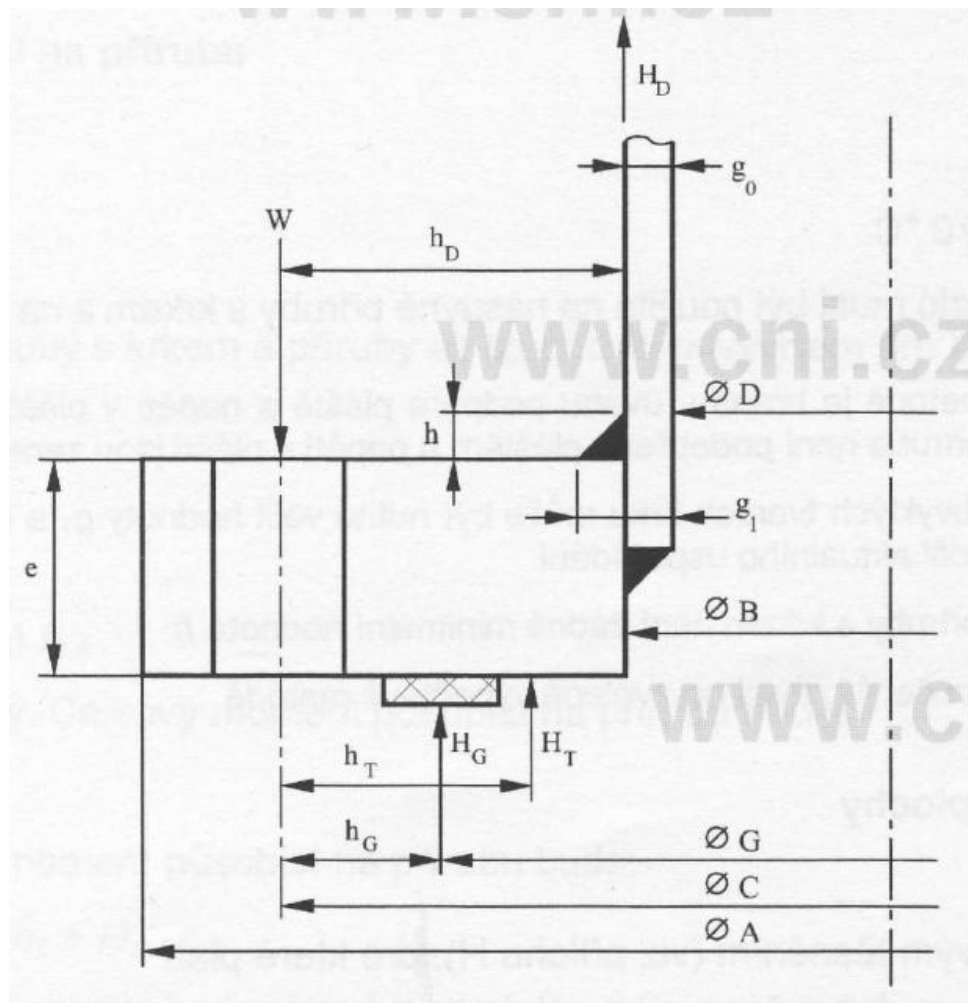
$$B = 665\text{mm}$$

$$C = 725\text{mm}$$

$$d_b = 20\text{mm}$$

$$e = 22\text{mm}$$

$g_0 = 12,5\text{mm}$   
 $g_1 = 25\text{mm}$   
 $G = 685\text{mm}$   
 $h = 12\text{mm}$   
 $k = 1$   
 $m = 1$   
 $n = 36$   
 $P = 0,0826\text{MPa}$   
 $w = 16\text{mm}$   
 $y = 1,4\text{MPa}$



Obr. 6.4: Hlavní rozměry pro kontrolu příruby [4]

Výpočet:

Dovolené namáhání materiálu příruby

$$f = \min\left(\frac{R_e}{1,5}; \frac{R_m}{2,4}\right) \quad (6.47)$$

$$f = 170,833\text{MPa}$$

Dovolené namáhání materiálu šroubu při montážní teplotě



$$f_B = \min\left(\frac{R_{eb}}{3}; \frac{R_{mb}}{4}\right) \quad (6.48)$$

$$f_B = 100\text{MPa}$$

Dovolené namáhání materiálu šroubu při provozní teplotě

$$f_{BA} = f_B \quad (6.49)$$

$$f_{BA} = 100\text{MPa}$$

### **Zatížení šroubů a plochy**

$$b_0 = \frac{w}{2}$$

$$b_0 = \frac{16}{2} \quad (6.50)$$

$$b_0 = 8\text{mm}$$

Jestliže  $b_0 \leq 6,3\text{mm}$ , pak  $b = b_0$ . Jestliže  $b_0 > 6,3\text{mm}$ , pak  $b = 2,52 \cdot \sqrt{b_0}$

$$b = 2,52 \cdot \sqrt{b_0}$$

$$b = 2,52 \cdot \sqrt{8} \quad (6.51)$$

$$b = 7,128\text{mm}$$

Celková osová síla od tlaku:

$$H = \frac{\pi}{4} \cdot G^2 \cdot P$$

$$H = \frac{\pi}{4} \cdot 685^2 \cdot 0,083 \quad (6.52)$$

$$H = 30443,08\text{N}$$

Tlaková síla na těsnění pro dosažení těsnosti:

$$H_G = 2 \cdot \pi \cdot G \cdot b \cdot m \cdot P$$

$$H_G = 2 \cdot \pi \cdot 685 \cdot 7,128 \cdot 1 \cdot 0,083 \quad (6.53)$$

$$H_G = 2533,325\text{N}$$

Zatížení šroubů a plochy průřezu musí být vypočteny jak pro montážní stav, tak i pro stav provozní následovně:

a) Montážní stav: Minimální zatížení šroubů je dáno:

$$W_A = \pi \cdot b \cdot G \cdot y$$

$$W_A = \pi \cdot 7,128 \cdot 685 \cdot 1,4 \quad (6.54)$$

$$W_A = 21474,053\text{N}$$

b) Provozní stav: Minimální zatížení šroubů je dáno:

$$W_{op} = H + H_G$$

$$W_{op} = 30443,08 + 2533,325 \quad (6.55)$$

$$W_{op} = 32966,404\text{N}$$

Požadovaná plocha průřezů šroubů  $A_{B,min}$  je dána:

$$A_{B,min} = \max\left(\frac{W_A}{f_{B,A}}; \frac{W_{op}}{f_B}\right)$$

$$A_{B,min} = \max\left(\frac{21474,053}{100}; \frac{32966,404}{100}\right) \quad (6.56)$$

$$A_{B,min} = 329,664 \text{mm}^2$$

Skutečná plocha šroubů:

$$A_B = n \cdot A_{B1}$$

$$A_B = 36 \cdot 225,2 \quad (6.57)$$

$$A_B = 8107,2 \text{mm}^2$$

Musí platit  $A_B \geq A_{B,min}$

$$8107 \text{mm}^2 \geq 329,664 \text{mm}^2 \quad \textbf{vyhovuje}$$

Momenty působící na přírubu

$$H_D = \frac{\pi}{4} \cdot B^2 \cdot P$$

$$H_D = \frac{\pi}{4} \cdot 665^2 \cdot 0,083 \quad (6.58)$$

$$H_D = 28681,909 \text{N}$$

$$H_T = H - H_D$$

$$H_T = 30443,08 - 2533,325 \quad (6.59)$$

$$H_T = 1751,171 \text{N}$$

$$h_D = \frac{C - B - g_1}{2}$$

$$h_D = \frac{725 - 665 - 25}{2} \quad (6.60)$$

$$h_D = 17,5 \text{m}$$

$$h_G = \frac{C - G}{2}$$

$$h_G = \frac{725 - 685}{2} \quad (6.61)$$

$$h_G = 20 \text{mm}$$

$$h_T = \frac{2 \cdot C - B - G}{4}$$

$$h_T = \frac{2 \cdot 725 - 665 - 685}{4} \quad (6.62)$$

$$h_T = 25 \text{ mm}$$

Výpočtové zatížení šroubů ve smontovaném stavu:

$$W = 0,5 \cdot (A_{B,\min} + A_B) \cdot f_{B,A}$$

$$W = 0,5 \cdot (329,664 + 8107,2) \cdot 100 \quad (6.63)$$

$$W = 421843,202 \text{ N}$$

a) Smontovaný stav příruby. Celkový moment působící na přírubu bude:

$$M_A = W \cdot h_G$$

$$M_A = 421843,202 \cdot 25 \quad (6.64)$$

$$M_A = 12655296,07 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

b) Provozní stav. Celkový moment působící na přírubu bude:

$$M_{op} = H_D \cdot h_D + H_T \cdot h_T + H_G \cdot h_G$$

$$M_{op} = 28681,909 \cdot 17,5 + 1751,171 \cdot 25 + 2533,325 \cdot 20 \quad (6.65)$$

$$M_{op} = 621712,416 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

**Napětí v přírubě**

$$C_F = \max \left( \sqrt{\frac{\delta_b}{2 \cdot d_b + \frac{6 \cdot e}{m + 0,5}}}; 1 \right) \quad (6.66)$$

$$C_F = 1$$

$$K = \frac{A}{B} \quad (6.67)$$

$$K = 1,18$$

$$l_0 = \sqrt{B \cdot g_0} \quad (6.68)$$

$$l_0 = 91,173 \text{ mm}$$

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \log_{10}(K)) - 1}{(1,0472 + 1,9448 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} \quad (6.69)$$

$$\beta_T = 3,496$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55246 \cdot \log_{10}(K)) - 1}{1,36136 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} \quad (6.70)$$

$$\beta_U = 24,525$$

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \cdot \left( 0,66845 + 5,7169 \cdot \frac{K^2 \cdot \log_{10}(K)}{K^2 - 1} \right) \quad (6.71)$$

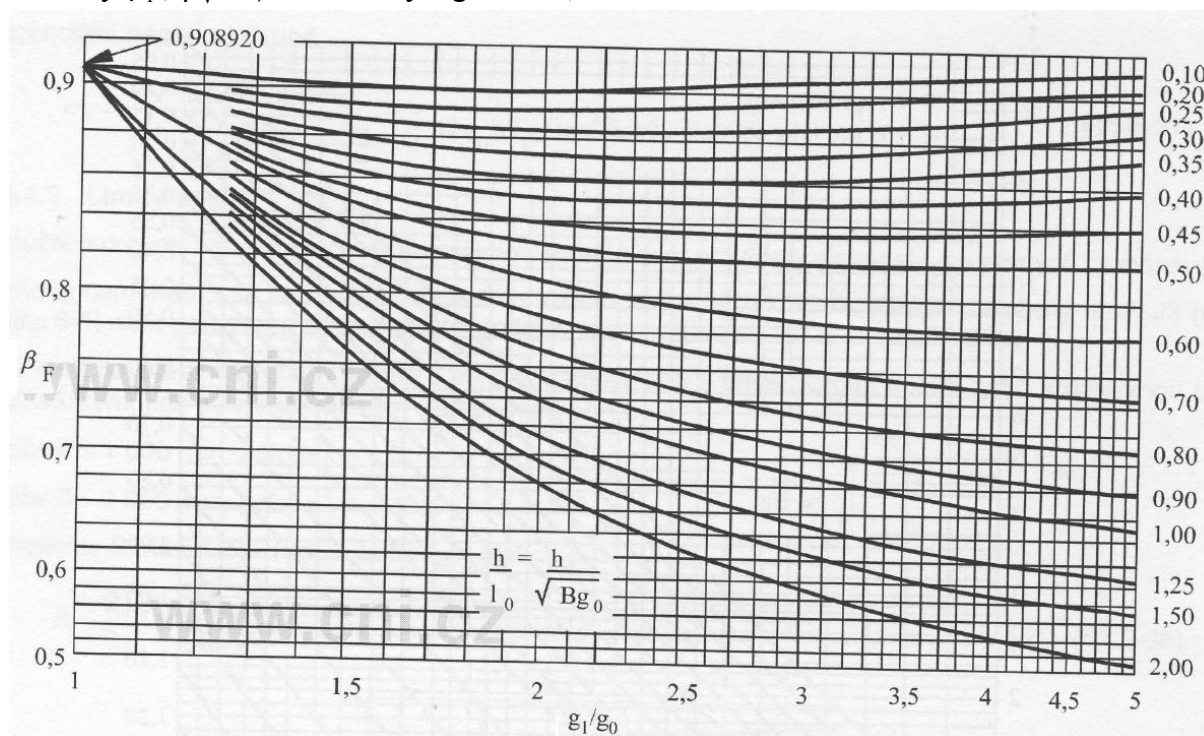
$$\beta_Y = 22,318$$

Integrální metoda:

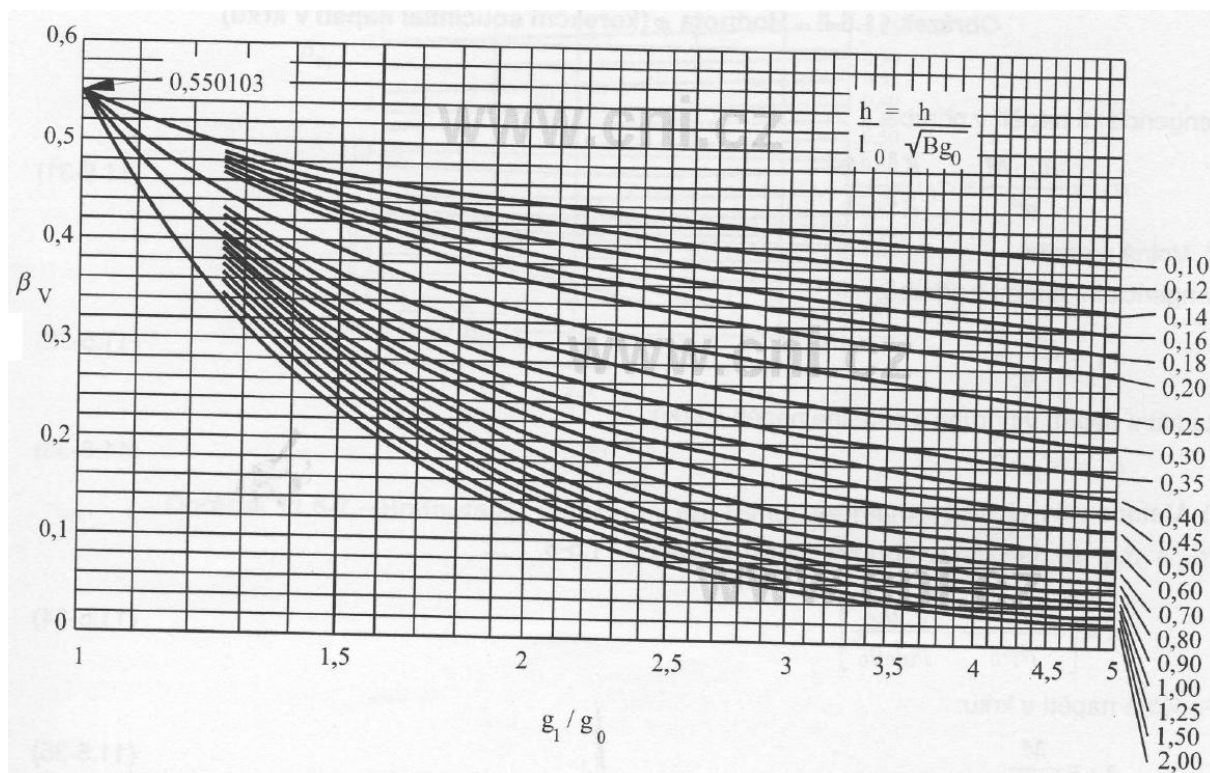
Stanovení hodnot pro hledání v grafech:

$$\frac{g_1}{g_0} = 2 \quad \frac{h}{l_0} = 0,132$$

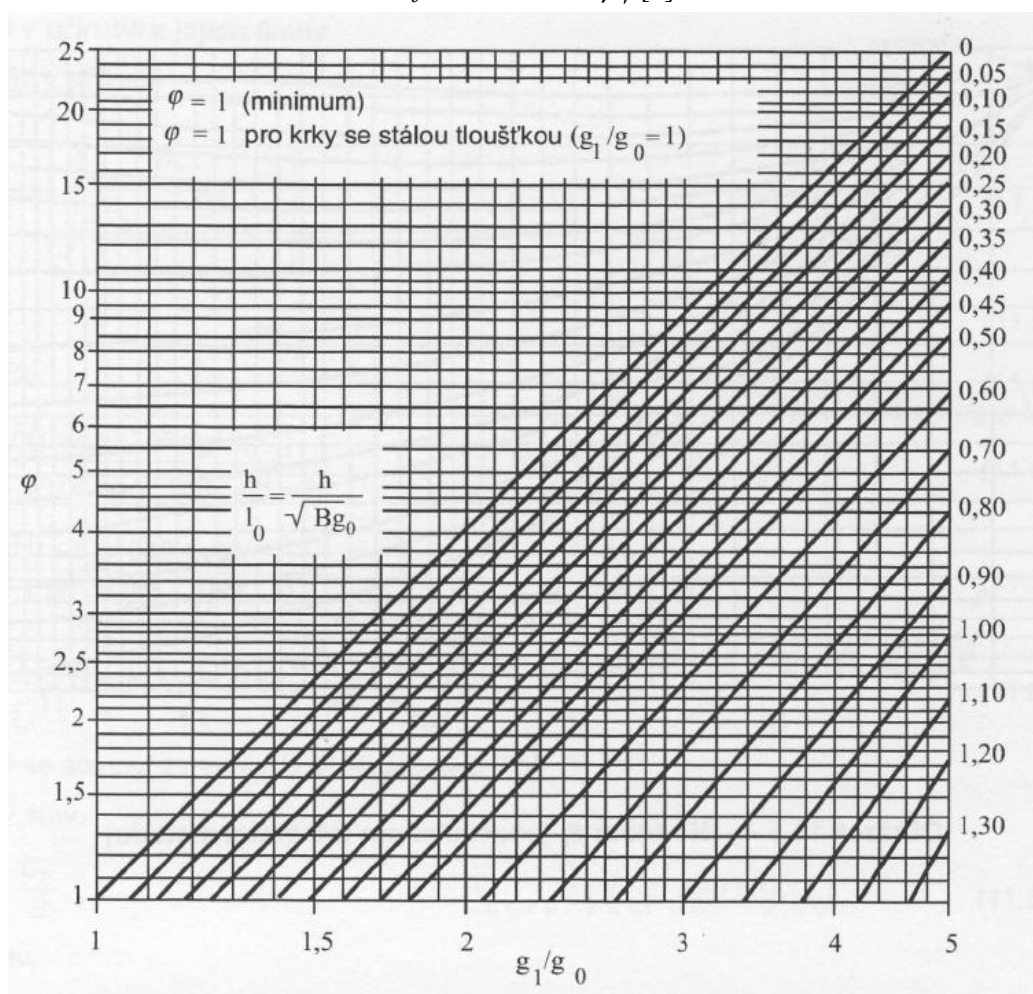
Hodnoty  $\beta_F$ ,  $\beta_V$  a  $\varphi$  se stanoví z grafů 6.4, 6.5 a 6.6:



Graf 6.4: Hodnota  $\beta_F$  [4]



Graf 6.5: Hodnota  $\beta_V$  [4]



Graf 6.6: Hodnota  $\varphi$  [4]

$$\lambda = \left( \frac{e \cdot \beta_F + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{e^3 \cdot \beta_V}{\beta_U \cdot l_0 \cdot g_0^2} \right) \quad (6.72)$$

$$\lambda = 0,361$$

**Napětí v přírubě ve smontovaném stavu:**

$$M = M_A \cdot \frac{C_F}{B} \quad (6.73)$$

$$M = 12687,014 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Podélné napětí v krku:

$$\sigma_H = \frac{\varphi \cdot M}{\lambda \cdot g_1^2} \quad (6.74)$$

$$\sigma_H = 157,614 \text{ MPa}$$

Radiální napětí:

$$\sigma_r = \frac{(1,333 \cdot e \cdot \beta_F + l_0) \cdot M}{\lambda \cdot e^2 \cdot l_0} \quad (6.75)$$

$$\sigma_r = 93,732 \text{ MPa}$$

Tangenciální napětí v přírubě:

$$\sigma_\theta = \frac{\beta_V \cdot M}{e^2} - \sigma_r \cdot \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad (6.76)$$

$$\sigma_\theta = 14,838 \text{ MPa}$$

**Limity napětí**

$$k \cdot \sigma_H \leq 1,5 \cdot \min(f; f_H) \quad \underline{\text{vyhovuje}}$$

$$157,614 \text{ MPa} \leq 256,25 \text{ MPa}$$

$$k \cdot \sigma_r \leq f \quad \underline{\text{vyhovuje}}$$

$$93,732 \text{ MPa} \leq 170,833 \text{ MPa}$$

$$k \cdot \sigma_\theta \leq f \quad \underline{\text{vyhovuje}}$$

$$14,838 \text{ MPa} \leq 170,833 \text{ MPa}$$

$$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_H + \sigma_r) \leq f \quad \underline{\text{vyhovuje}}$$

$$125,673 \text{ MPa} \leq 170,833 \text{ MPa}$$

$$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_H + \sigma_\theta) \leq f \quad \underline{\text{vyhovuje}}$$

$$86,226 \text{ MPa} \leq 170,833 \text{ MPa}$$

**Napětí v přírubě v provozním stavu:**

$$M = M_{op} \cdot \frac{C_F}{B} \quad (6.77)$$

$$M = 896,81 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Podélné napětí v krku:

$$\sigma_H = \frac{\varphi \cdot M}{\lambda \cdot g_1^2} \quad (6.78)$$

$$\sigma_H = 11,141 \text{ MPa}$$

Radiální napětí:

$$\sigma_r = \frac{(1,333 \cdot e \cdot \beta_F + l_0) \cdot M}{\lambda \cdot e^2 \cdot l_0} \quad (6.79)$$

$$\sigma_r = 6,626 \text{ MPa}$$

Tangenciální napětí v přírubě:

$$\sigma_\theta = \frac{\beta_Y \cdot M}{e^2} - \sigma_r \cdot \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad (6.80)$$

$$\sigma_\theta = 1,049 \text{ MPa}$$

**Limity napětí**

$$k \cdot \sigma_H \leq 1,5 \cdot \min(f; f_H) \quad \text{vyhovuje}$$

$$11,141 \text{ MPa} \leq 256,25 \text{ MPa}$$

$$k \cdot \sigma_r \leq f \quad \text{vyhovuje}$$

$$6,626 \text{ MPa} \leq 170,833 \text{ MPa}$$

$$k \cdot \sigma_\theta \leq f \quad \text{vyhovuje}$$

$$1,049 \text{ MPa} \leq 170,833 \text{ MPa}$$

$$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_H + \sigma_r) \leq f \quad \text{vyhovuje}$$

$$8,883 \text{ MPa} \leq 170,833 \text{ MPa}$$

$$0,5 \cdot k \cdot (\sigma_H + \sigma_\theta) \leq f \quad \text{vyhovuje}$$

$$6,095 \text{ MPa} \leq 170,833 \text{ MPa}$$

Přišroubované kruhové ploché víko s úzkým těsněním

Minimální tloušťka uvnitř těsnění musí být dána:

$$e_A = \sqrt{\frac{3 \cdot (C - G)}{\pi \cdot G} \cdot \left( \frac{W}{f_a} \right)} \quad (6.81)$$

$$e_A = 11,734 \text{ mm}$$

$$e_p = \sqrt{\left[ \frac{3 \cdot (3 + \nu)}{32} \cdot G^2 + 3 \cdot \left( \frac{G}{4} + 2 \cdot b \cdot m \right) \cdot (C - G) \right] \cdot \frac{P}{f_a}} \quad (6.82)$$

$$e_p = 8,996 \text{ mm}$$

$$e_v = \max(e_A; e_p) \quad (6.83)$$

$$e_v = 11,734 \text{ mm}$$

Minimální tloušťka přírubového okraje je dána:

$$e_{pl} = \sqrt{3 \cdot \left( \frac{G}{4} + 2 \cdot b \cdot m \right) \cdot (C - G) \cdot \frac{P}{f_a}} \quad (6.84)$$

$$e_{pl} = 3,28 \text{ mm}$$

$$e_{vl} = \max(e_A; e_{pl}) \quad (6.85)$$

$$e_{vl} = 11,734 \text{ mm}$$

Bude zvolena tloušťka víka 16mm dle minimálních požadavků v normě EN 14015.



## 7. MKP výpočet

Byla provedena MKP analýza celé nádrže, s následným vyhodnocením a kategorizací napětí na plášti a střeše nádrže. Analyzovány byly 4 stavy: zkušební, provozní s přetlakem, provozní s pod tlakem a prázdná nádrž během odstávky.

V diplomové práci byla provedena napěťová analýza pro provozní stav s přetlakem v nádrži a zatížením sněhem. Ostatní stavy jsou uvedeny v Příloze 3.

Parametry zadání pro MKP analýzu jsou uvedeny v Tab. 7.1.

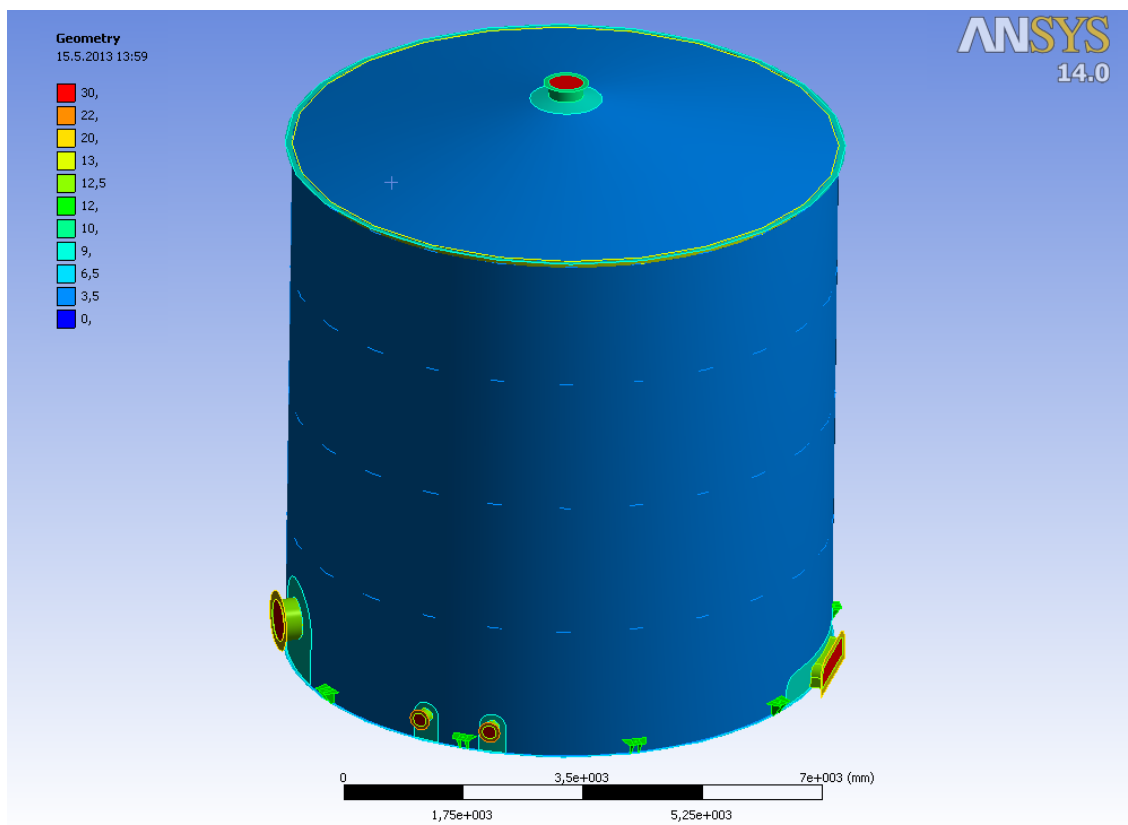
Tab. 7.1: Zadání MKP analýzy

Zadání	Jednotky	Zkušební	Provozní
Hydrostatický tlak – zkušební médium + hustota	kg/m <sup>3</sup>	Voda 1000	Petrolej 860
Tlak	kPa	3,3	3
Podtlak	kPa	0	0,3
Zatížení sněhem	kPa	0	2
Korozní přídavek – plášť	mm	0	1
Korozní přídavek – střecha	mm	0	1
Korozní přídavek – hrdla	mm	0	0

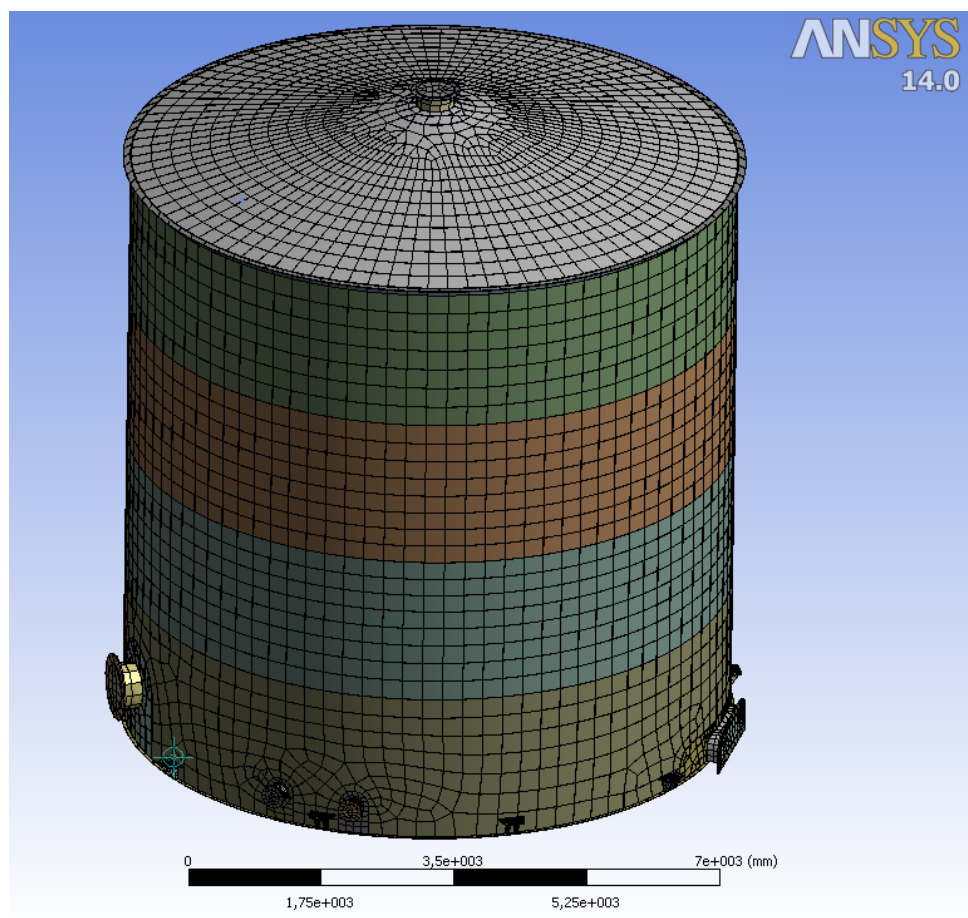
### 7.1. Výpočtový model

Při kontrolním výpočtu by využito skořepinové teorie. Byl vytvořen plošný model v programu SolidWorks. Model byl následně převeden do programu Ansys Workbench. Tloušťky pláště, dna, střechy a hrdel byly zvoleny z kontrolního pevnostního výpočtu dle normy EN 14 015. Hodnoty tloušťek plochých den uzavírající hrdla byly zvoleny. Použité tloušťky stěn je možno vidět na obr. 7.1. Potřebné vzájemné vazby byly softwarem automaticky vygenerovány. Pro potřeby numerické simulace byla vytvořena mapovaná síť, viz obr. 7.2.

Tloušťky plechů pláště, střechy a dna byly zadány ve zkorodovaném stavu, a se zápornou výrobní tolerancí, které byla zadána vedoucím práce 10% původní tloušťky plechu.



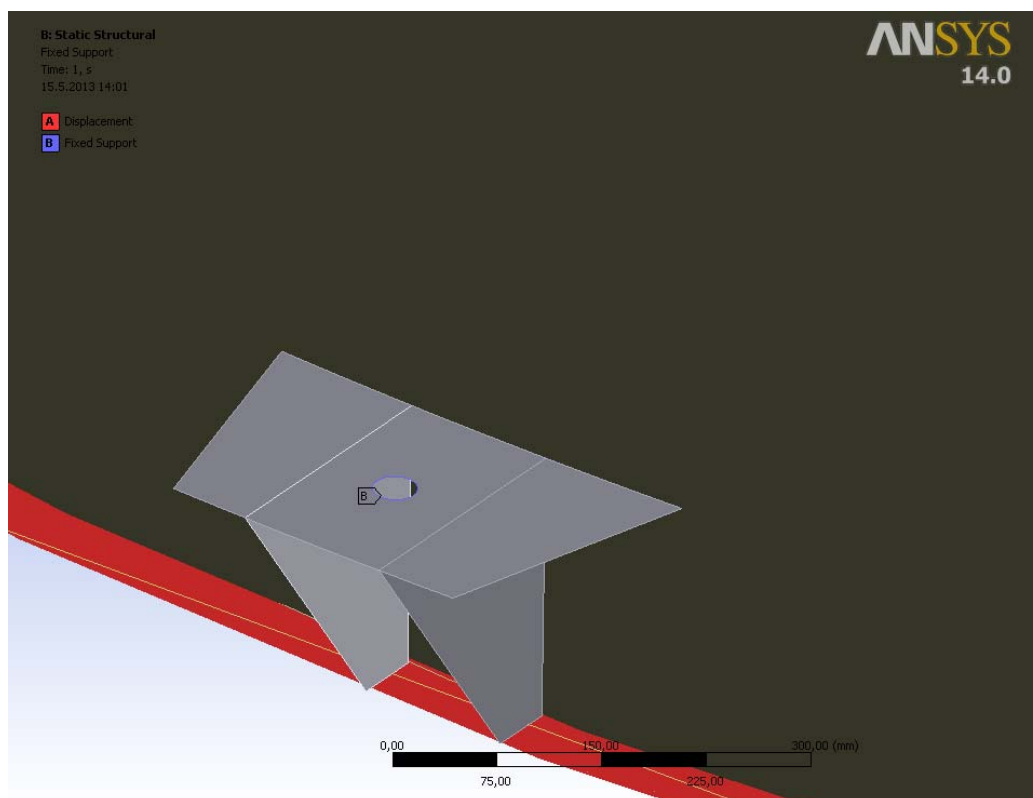
Obr. 7.1: Zadání tloušťky stěn pro model napěťové analýzy nádrže ve zkušebním stavu



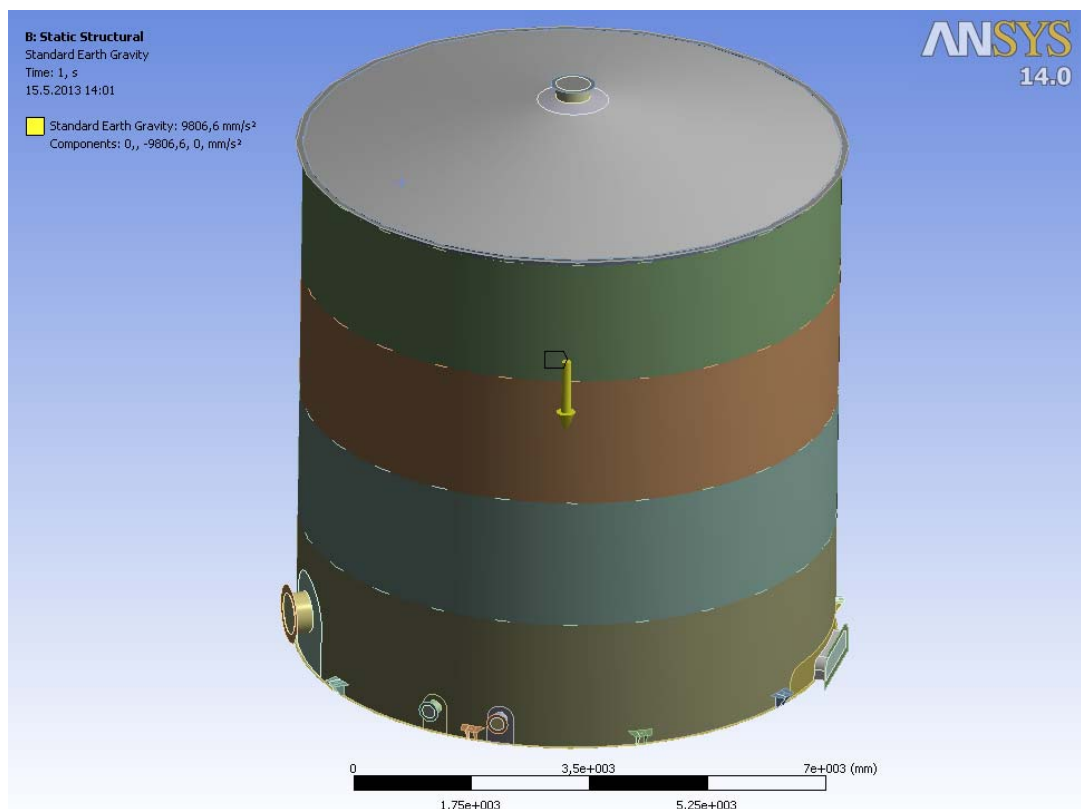
Obr. 7.2: Nasíťování výpočtového modelu pro napěťovou analýzu nádrže v provozním stavu

## 7.2. Napět'ová analýza

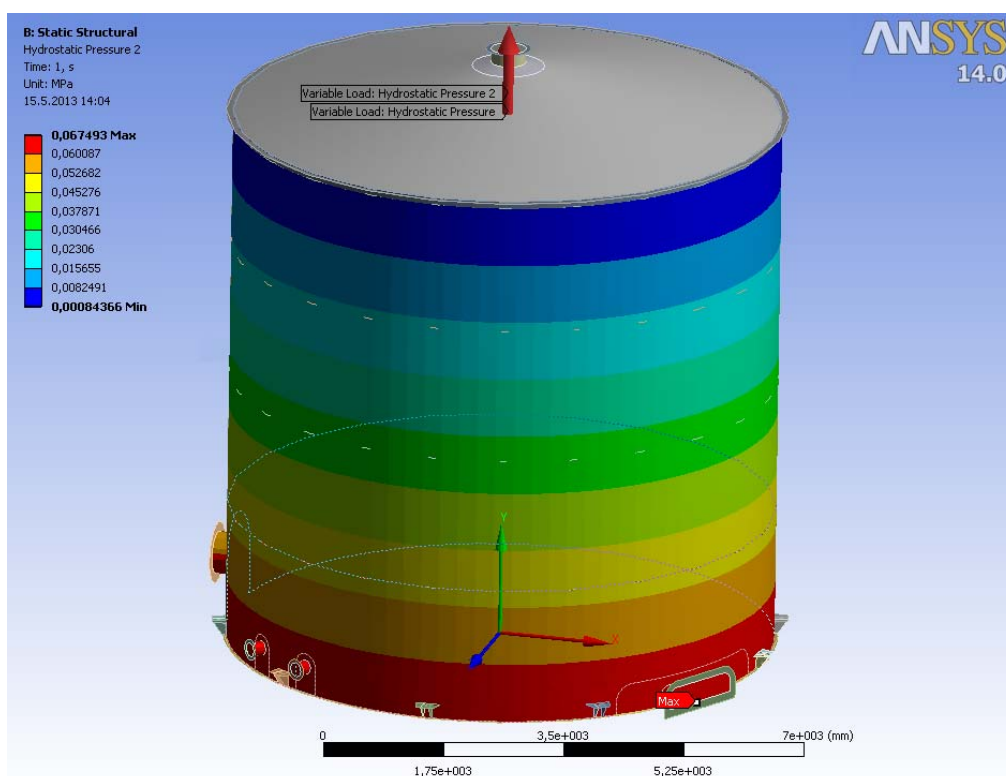
Cílem této analýzy bylo zjištění rozložení napětí v plášti a střeše uskladňovací nádrže. Jako okrajové podmínky byly zadány nulový posuv dna nádrže ve směru Y, a pevné přichycení děr pro šrouby na kotvách viz obr. 7.3. Dále bylo zadáno zatížení vlastní hmotností (obr. 7.4), hydrostatickým tlakem vně nádrže (obr.7.5), provozním tlakem v nádrži (obr.7.6) a zatížení sněhem na střeše nádrže (obr. 7.7).



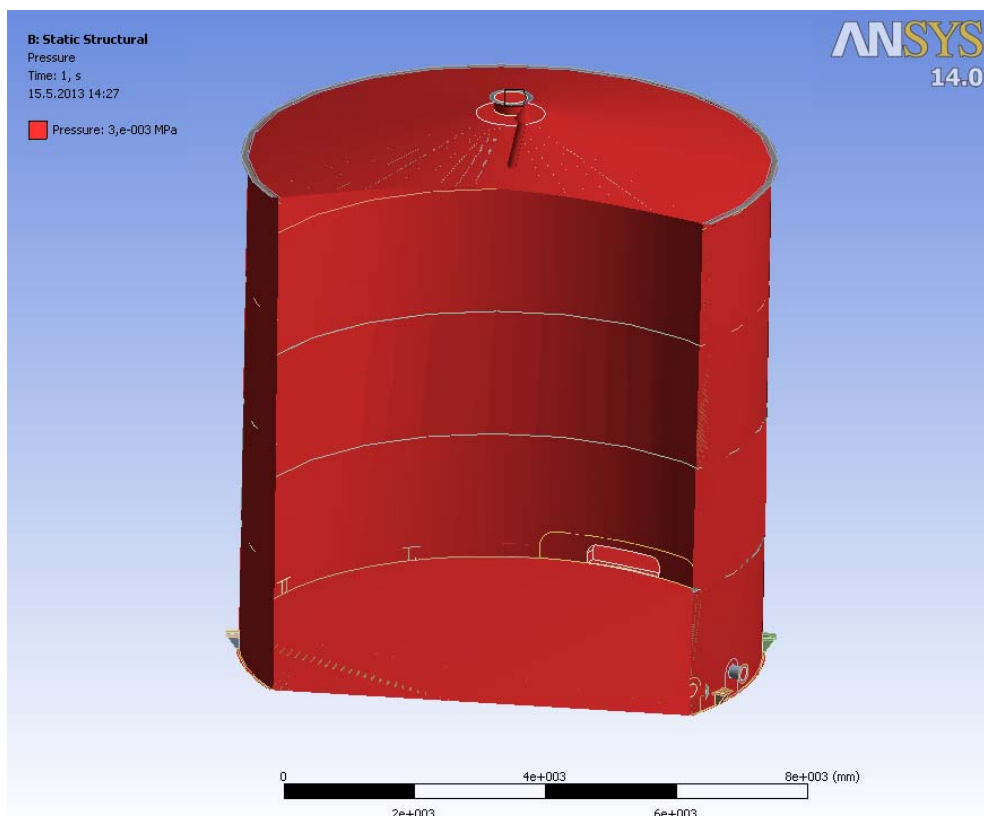
Obr. 7.3: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – omezení posuvu, pevné uchycení



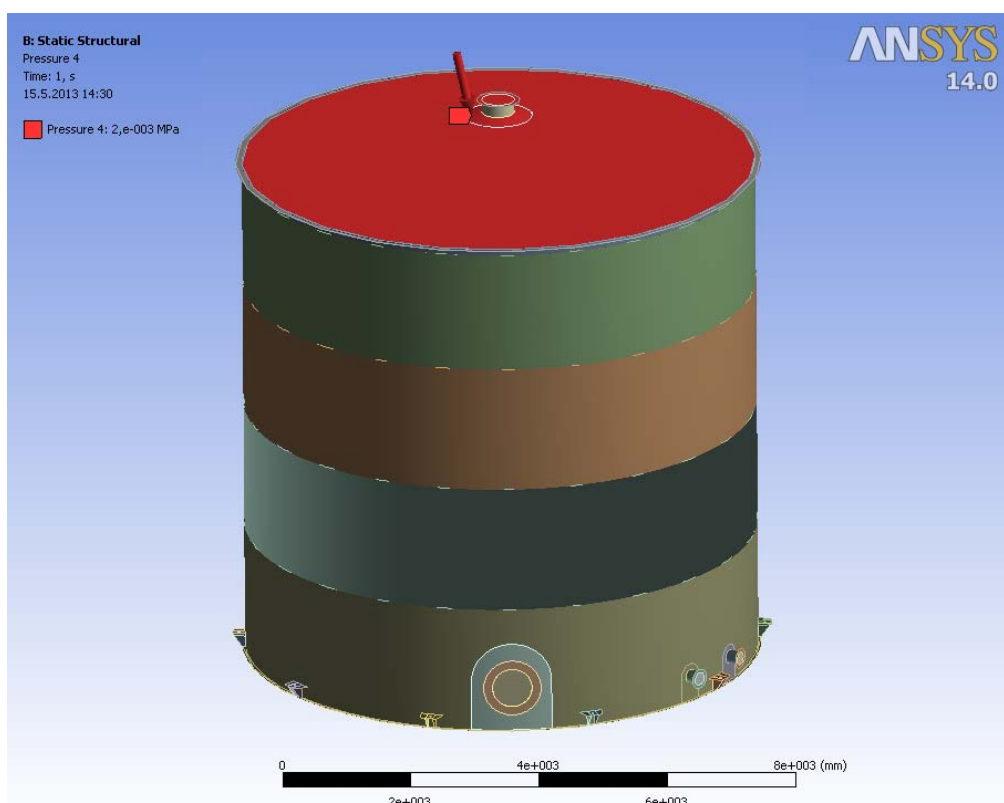
Obr. 7.4: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – vlastní tíhy



Obr. 7.5: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – hydrostatický tlak



*Obr. 7.6: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – provozní tlak*



*Obr. 7.7: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – zatížení sněhem*

## Kategorizace napětí

Dovolené zkušební napětí

$$f_t = \min(0,75 \cdot R_e; 260)$$

$$f_t = \min(0,75 \cdot 235; 260)$$

$$f_t = 176,25 \text{ MPa}$$

Dovolené provozní napětí

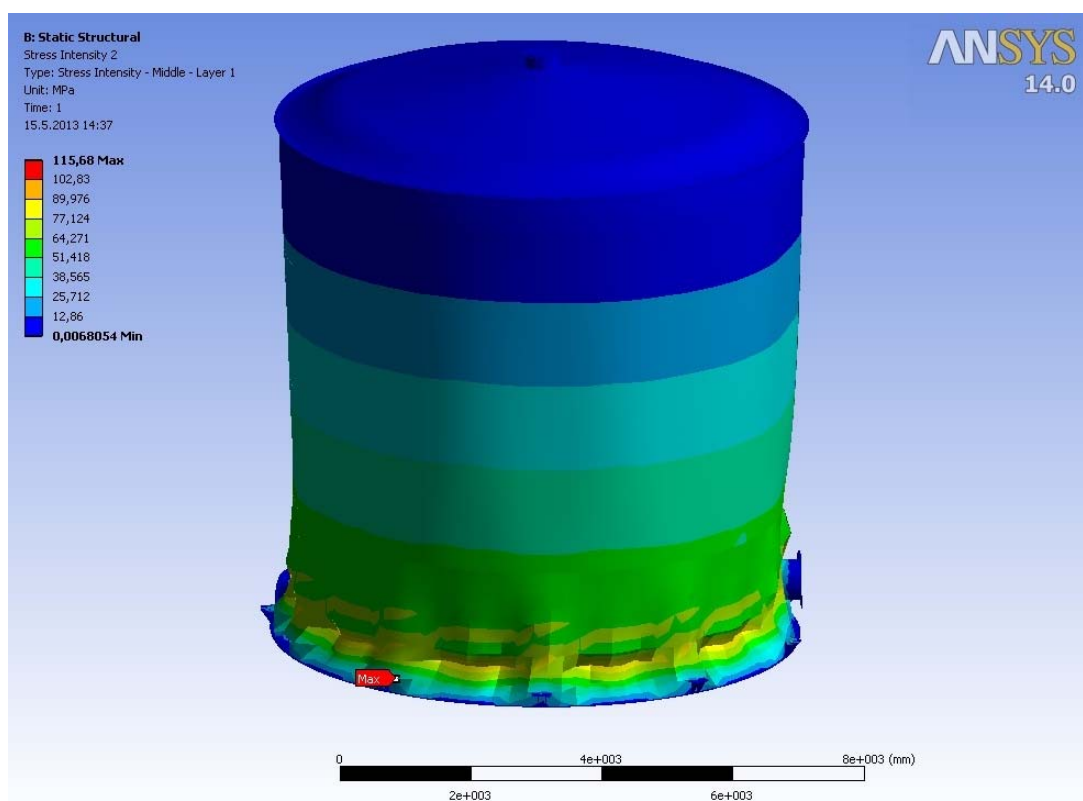
$$f = \min\left(\frac{2}{3} \cdot R_e; 260\right)$$

$$f = \min\left(\frac{2}{3} \cdot 235; 260\right)$$

$$f = 156,667 \text{ MPa}$$

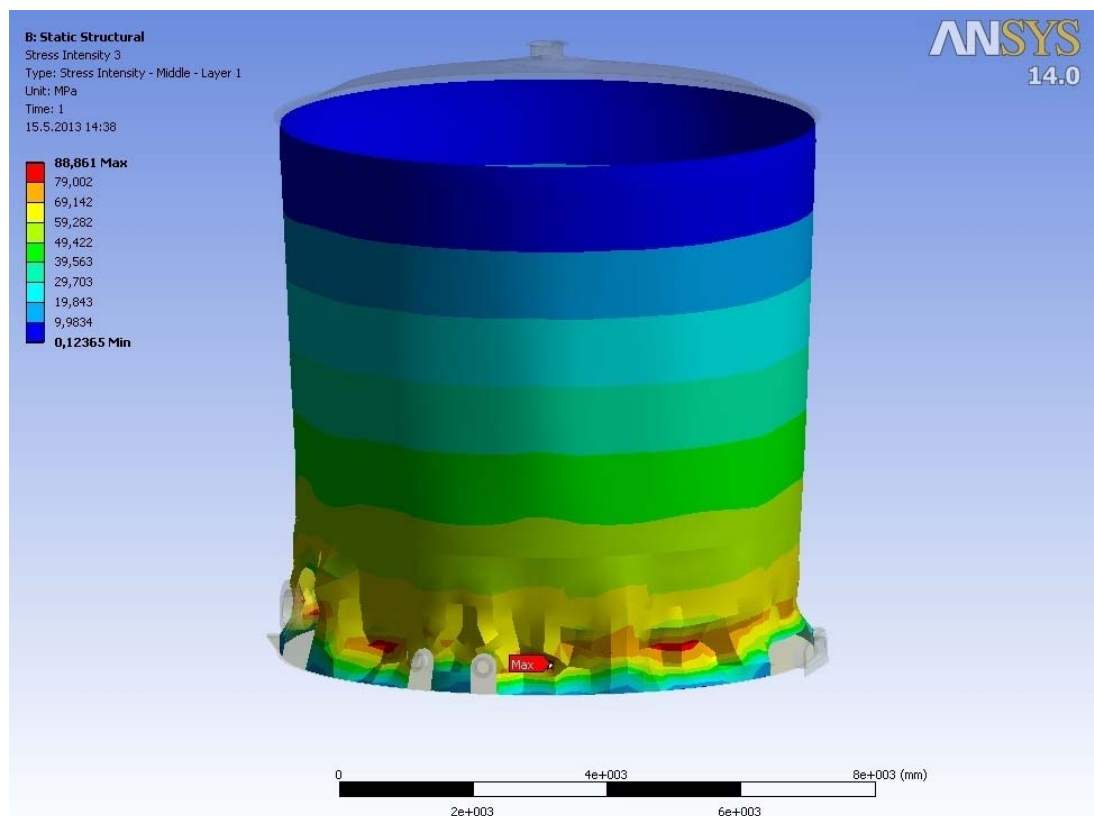
## Omezení ekvivalentních primárních napětí

- pro membránové napětí v celé nádrži viz obr. 7.8



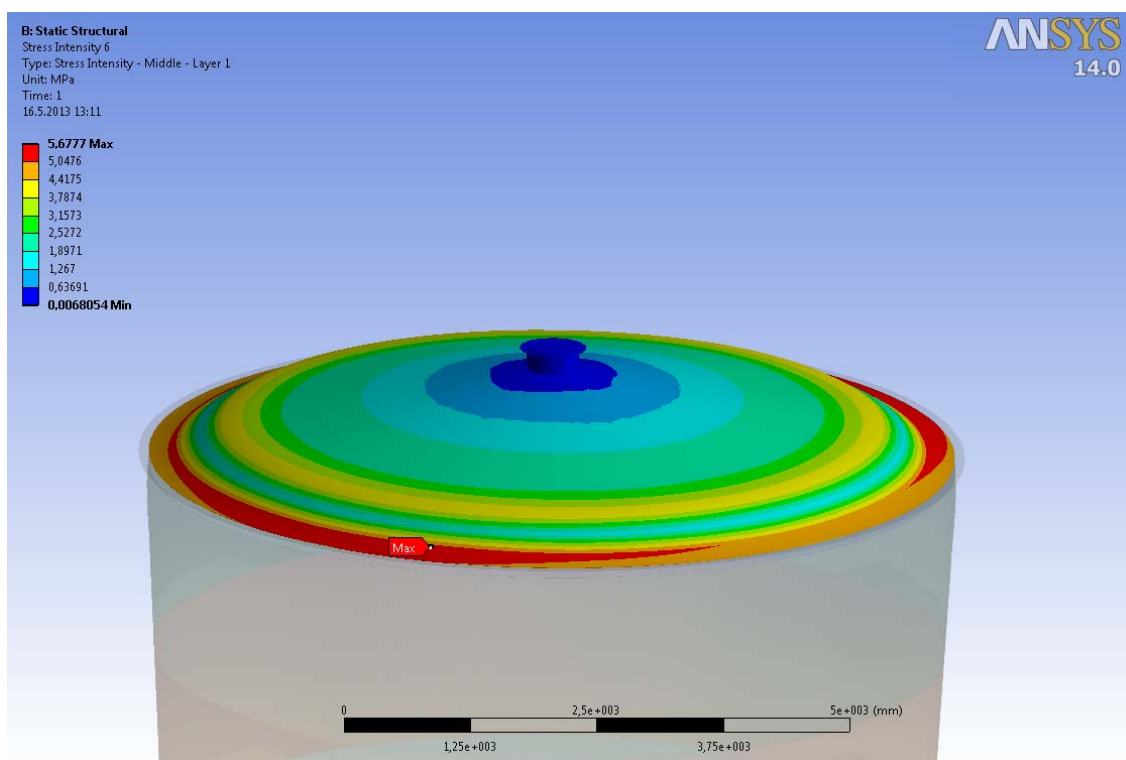
Obr. 7.8: Membránové napětí  $(\sigma)_1$

- pro membránové napětí na plášti viz obr. 7.9



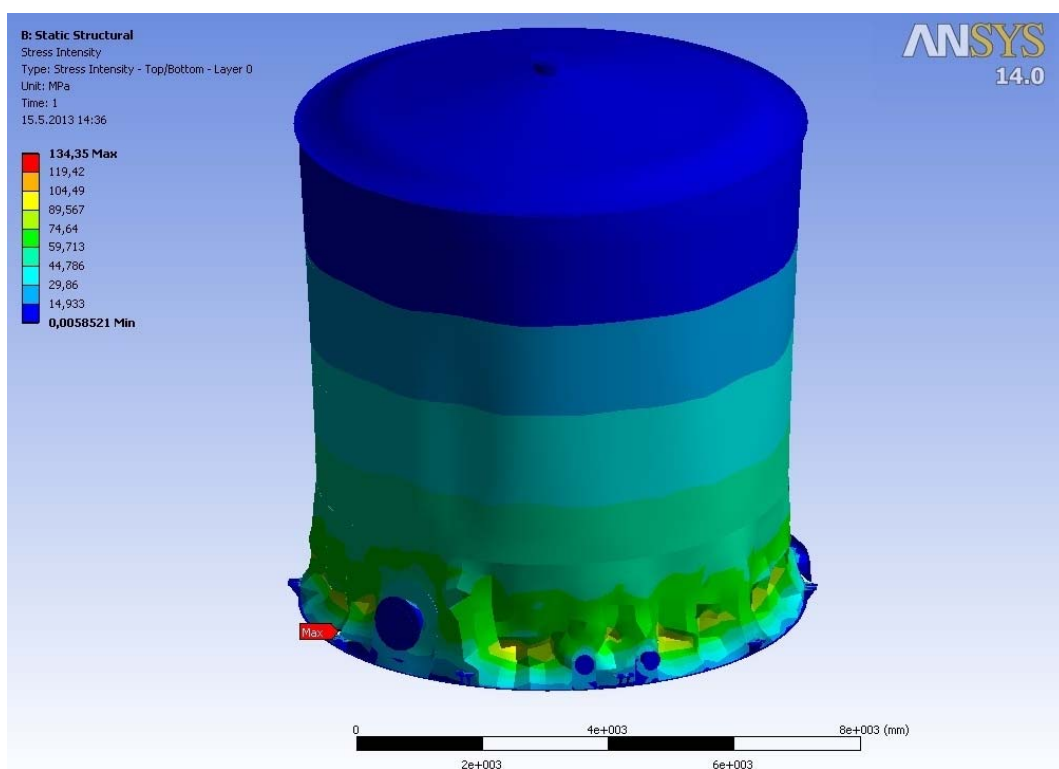
Obr. 7.9: Membránové napětí  $(\sigma)_1$  - plášť

- pro membránové napětí na střeše viz obr. 7.10



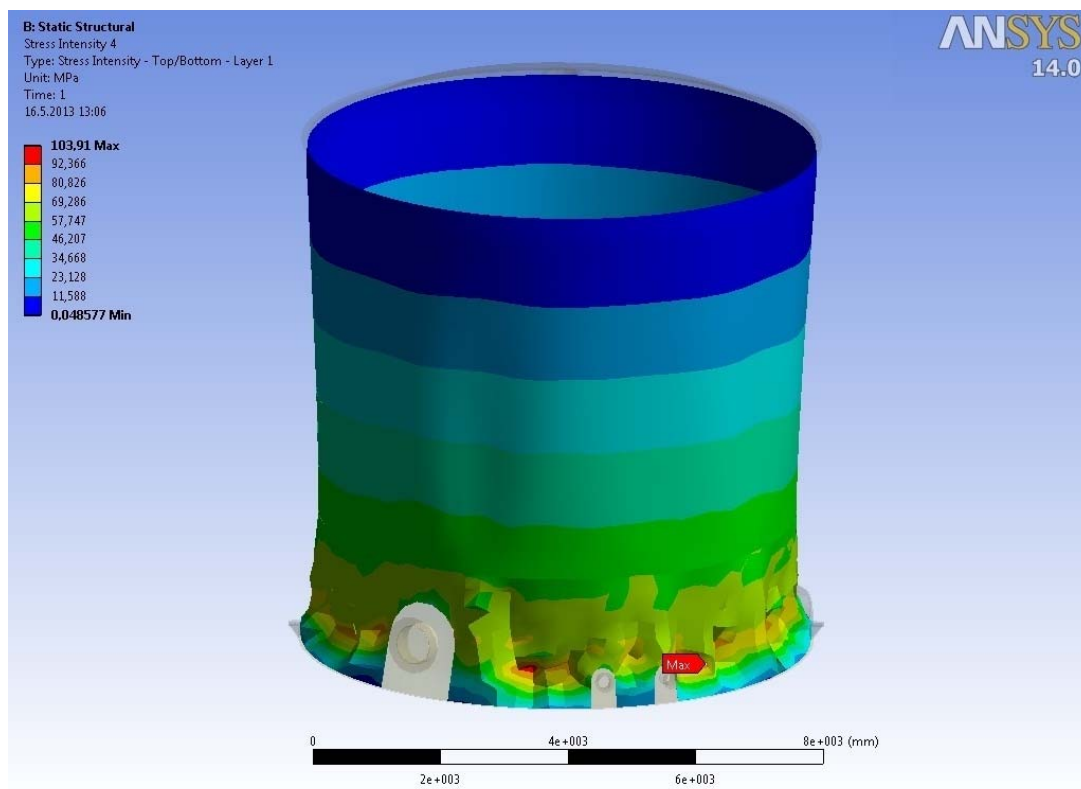
Obr. 7.10: Membránové napětí  $(\sigma)_1$  - střecha

- pro kombinaci membránové a ohybového napětí v celé nádrži viz obr. 7.11



Obr. 7.11: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$

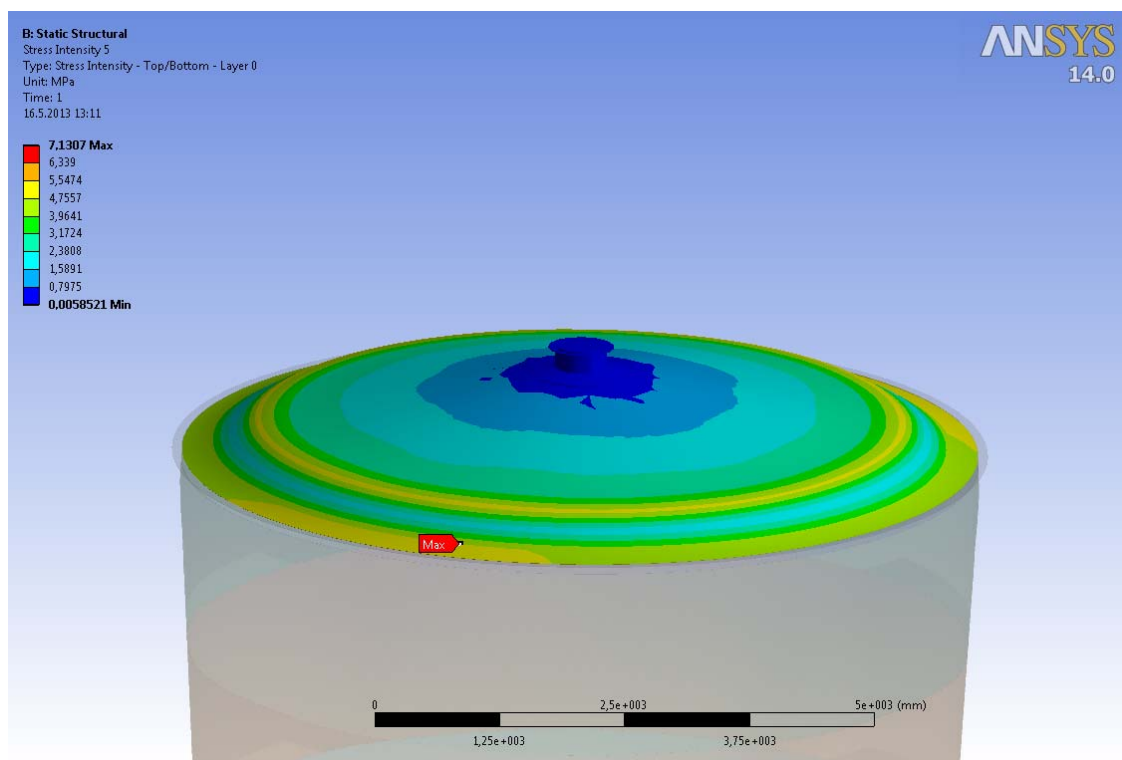
- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na plášti viz obr. 7.12



Obr. 7.12: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - plášť



- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na střeše viz obr. 7.13



Obr. 7.13: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - střecha

Výsledky napěťové analýzy byly shrnuty do Tab.7.2. Po porovnání s limitními hodnotami napětí je patrné, že uskladňovací nádrž je schopna odolávat provoznímu zatížení. **Nádrž vyhovuje.**

Tab. 7.2: hodnoty napětí ve všech zátěžných stavech

<b>Zkušební stav</b>						
Oblast	$(\sigma)_1$ [MPa]	$\diamond$	f [MPa]	$(\sigma)_2$ [MPa]	$\diamond$	$1,5 \cdot f$ [MPa]
Plášť	89,174	<	176,25	102,81	<	264,375
Střecha	31,997	<	176,25	54,956	<	264,375
<b>Provozní stav s přetlakem</b>						
Oblast	$(\sigma)_1$ [MPa]	$\diamond$	f [MPa]	$(\sigma)_2$ [MPa]	$\diamond$	$1,5 \cdot f$ [MPa]
Plášť	88,861	<	156,667	103,91	<	235
Střecha	5,678	<	156,667	7,13	<	235
<b>Provozní stav s podtlakem</b>						
Oblast	$(\sigma)_1$ [MPa]	$\diamond$	f [MPa]	$(\sigma)_2$ [MPa]	$\diamond$	$1,5 \cdot f$ [MPa]
Plášť	88,861	<	156,667	103,91	<	235
Střecha	5,678	<	156,667	7,13	<	235
<b>Odstávkový stav</b>						
Oblast	$(\sigma)_1$ [MPa]	$\diamond$	f [MPa]	$(\sigma)_2$ [MPa]	$\diamond$	$1,5 \cdot f$ [MPa]
Plášť	88,861	<	156,667	103,91	<	235
Střecha	5,678	<	156,667	7,13	<	235

## 8. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámení se s nadzemními velkoobjemovými uskladňovacími nádržemi, jejich návrhem a průmyslovým využitím.

V první části jsou shrnuty nejběžnější typy uskladňovacích nádrží, jejich konstrukcí, a výhodami jejich použití. Jsou zde i stručně popsány normy pro návrh a pevnostní kontrolu uskladňovacích nádrží, které jsou v souladu s platnou legislativou.

V druhé části byla řešena konkrétní nádrž dle zadání. Byl proveden návrhový a kontrolní pevnostní výpočet nádrže dle normy EN 14015. Příruba a víko bočního průlezu byly zkontrolovány dle normy ČSN EN 13445. Všechny kontrolované části vyhovují kontrolnímu výpočtu, byla tedy prokázána správnost navrhnutým rozměrů nádrže. Metodou konečných prvků byla provedena napěťová analýza na plášti a střeše nádrže. Napětí vyhovují při posouzení metodou kategorizace napětí.

V programu AutoCad byl vytvořen návrhový výkres nádrže s detaily jednotlivých uzlů. Pro výrobu nádrže je nutno vytvořit rozsáhlou výkresovou dokumentaci. To ale nebylo součástí práce. Výkres je přiložen jako příloha 2.

## 9. Seznam použité literatury

- [1] Schneider P.: Základy konstruování procesních zařízení, Moravské tiskařské závody Prostějov, Brno 1984.
- [2] Křupka V., Schneider P.: Konstrukce aparátů, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1998.
- [3] EN 14015 – Specifikace pro navrhování a výrobu nadzemních vertikálních válcových svařovaných ocelových nádrží s plochým dnem, zhotovování na místě provozování určených pro skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší, CEN květen 2005..
- [4] Obrázek převzat z: EN 14015 – Specifikace pro navrhování a výrobu nadzemních vertikálních válcových svařovaných ocelových nádrží s plochým dnem, zhotovování na místě provozování určených pro skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší, CEN květen 2005.
- [5] Obrázek převzat z WWW: [http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/CENMSFLZ6Z36/\\$FILE/TPSskladovani\\_ropy\\_prednaska.pdf](http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/CENMSFLZ6Z36/$FILE/TPSskladovani_ropy_prednaska.pdf)
- [6] Obrázek převzat z WWW: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/External\\_floating\\_roof\\_tank\\_%28double\\_deck%29.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/External_floating_roof_tank_%28double_deck%29.jpg)
- [7] <http://www.howstuffworks.com/water.htm> (online)
- [8] Obrázek převzat z WWW: <http://static.ddmcdn.com/gif/water-diagram.gif>
- [9] ČSN 69 8119-1 - Nadzemní svařované ocelové nádrže s plochým dnem pro skladování ropy a kapalných ropných produktů - Část 1: Technické požadavky, ČNI leden 1998
- [10] EN 1993-4-2 Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 4-2: Tanks, CEN červen 2006
- [11] API Standard 650 - Welded Steel Tanks for Fuel Storage, IHS Licensee říjen 2004
- [12] ČSN 69 8119-1 - Nadzemní svařované ocelové nádrže s plochým dnem pro skladování ropy a kapalných ropných produktů - Část 1: Technické požadavky [cit. 2013-05-20], ČNI leden 1998

## **10. Seznam příloh:**

Příloha 1: MKP analýza pláště a střechy – 4 zátěžné stavy

Příloha 2: Výkres sestavení uskladňovací nádrže

Příloha 3: CD

## Příloha 1:

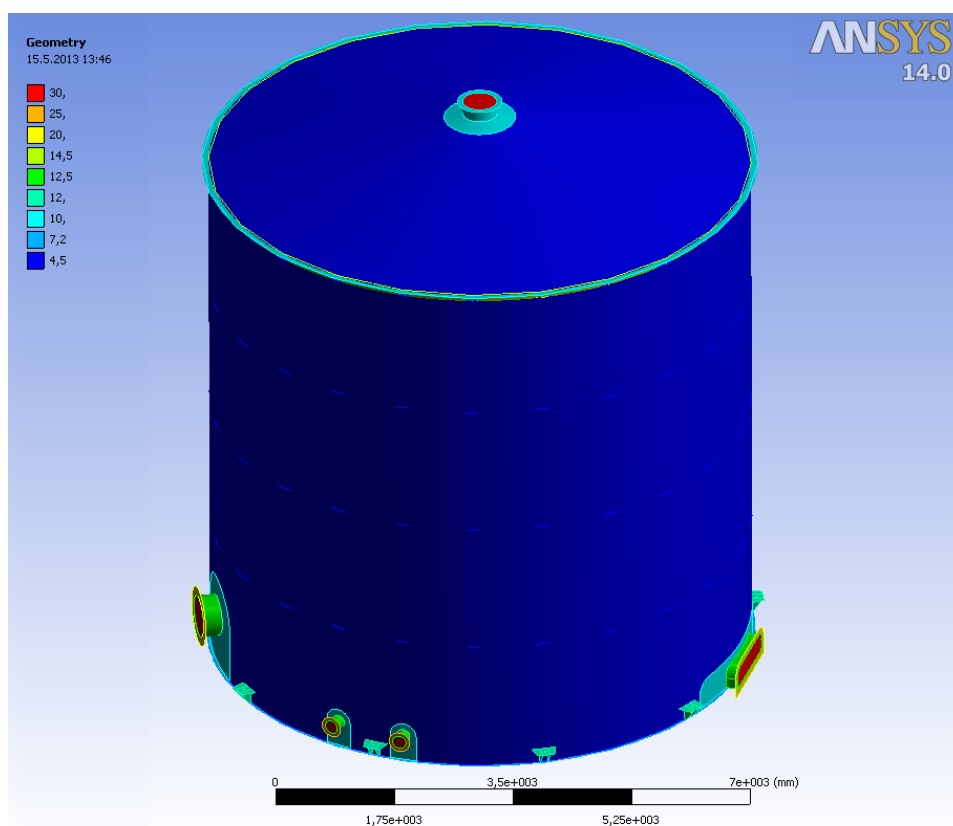
### MKP analýza pláště a střechy

Tab. 1.1: Zadání MKP analýzy

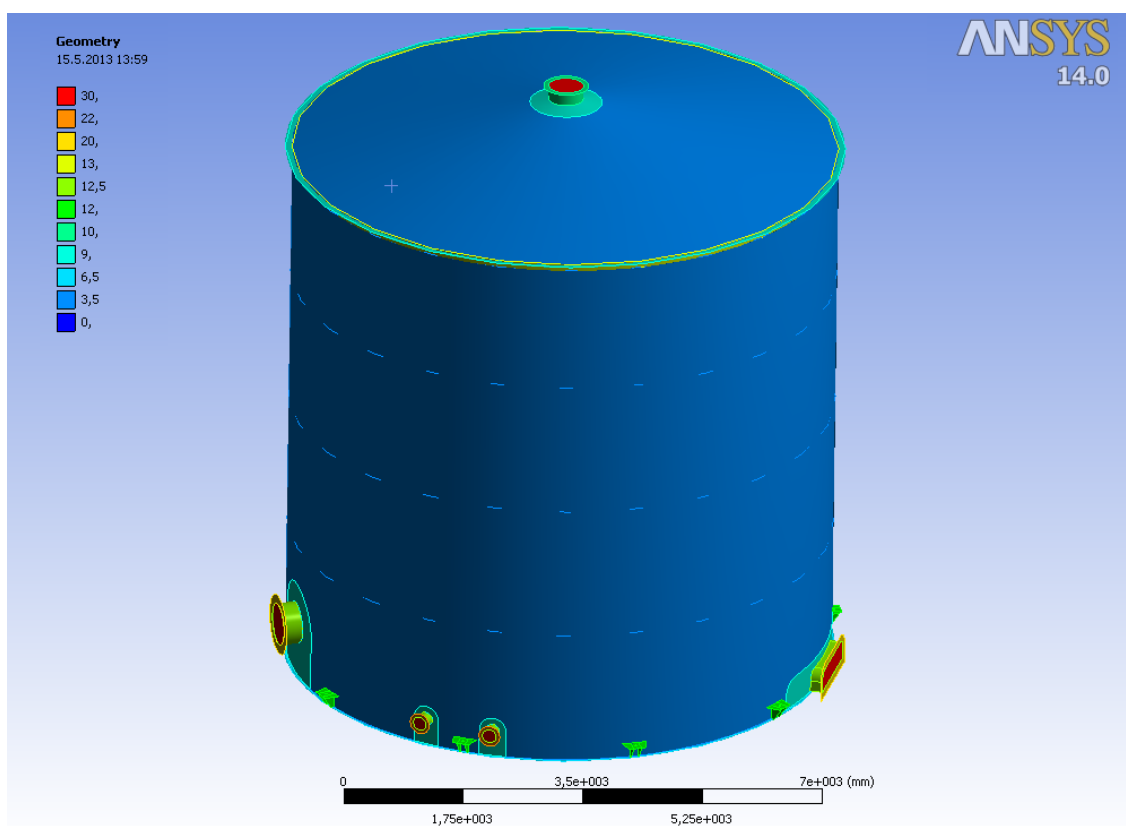
Zadání	Jednotky	Zkušební	Provozní
Hydrostatický tlak – zkušební médium + hustota	kg/m <sup>3</sup>	Voda 1000	Petrolej 860
Tlak	kPa	3,3	3
Podtlak	kPa	0	0,3
Zatížení sněhem	kPa	0	2
Korozní přídavek – plášť	mm	0	1
Korozní přídavek – střecha	mm	0	1
Korozní přídavek – hrdla	mm	0	0

### Výpočtový model

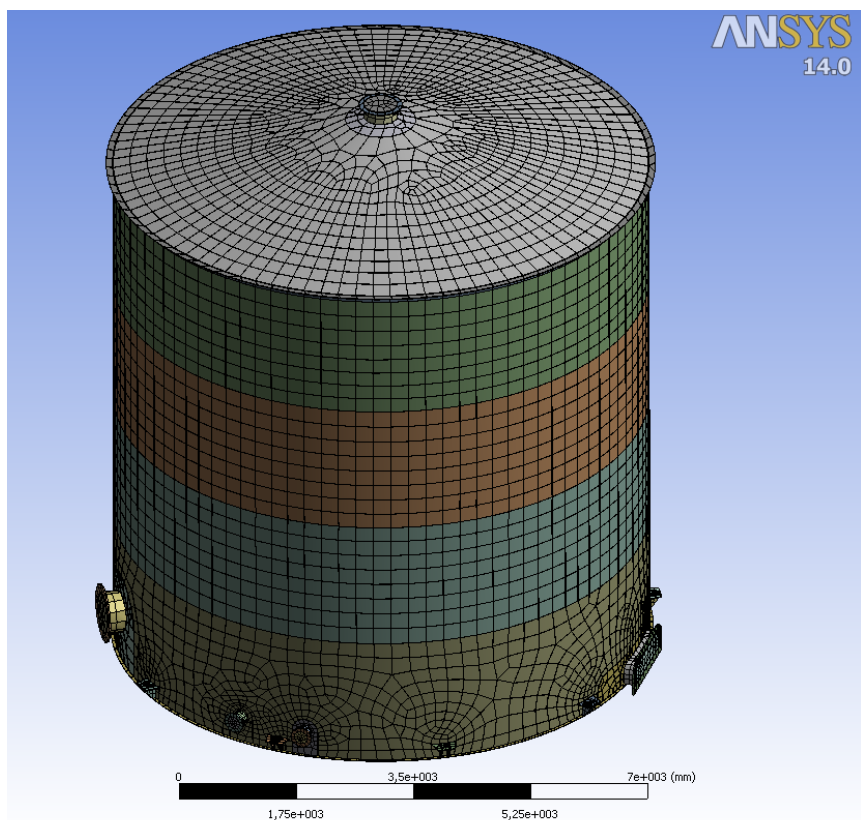
Při kontrolním výpočtu bylo využito skořepinové teorie. Byl vytvořen plošný model v programu SolidWorks. Model byl následně převeden do programu AnsysWorkbench. Tloušťky pláště, dna, střechy a hrdel byly zvoleny z kontrolního pevnostního výpočtu dle normy EN 14 015. Hodnoty tloušťek plochých den uzavírající hrdla byly zvoleny. Použité tloušťky stěn je možno vidět na obr. 1 a 2. Potřebné vzájemné vazby byly softwarem automaticky vygenerovány. Pro potřeby numerické simulace byla vytvořena mapovaná síť, viz obr.3 a 4.



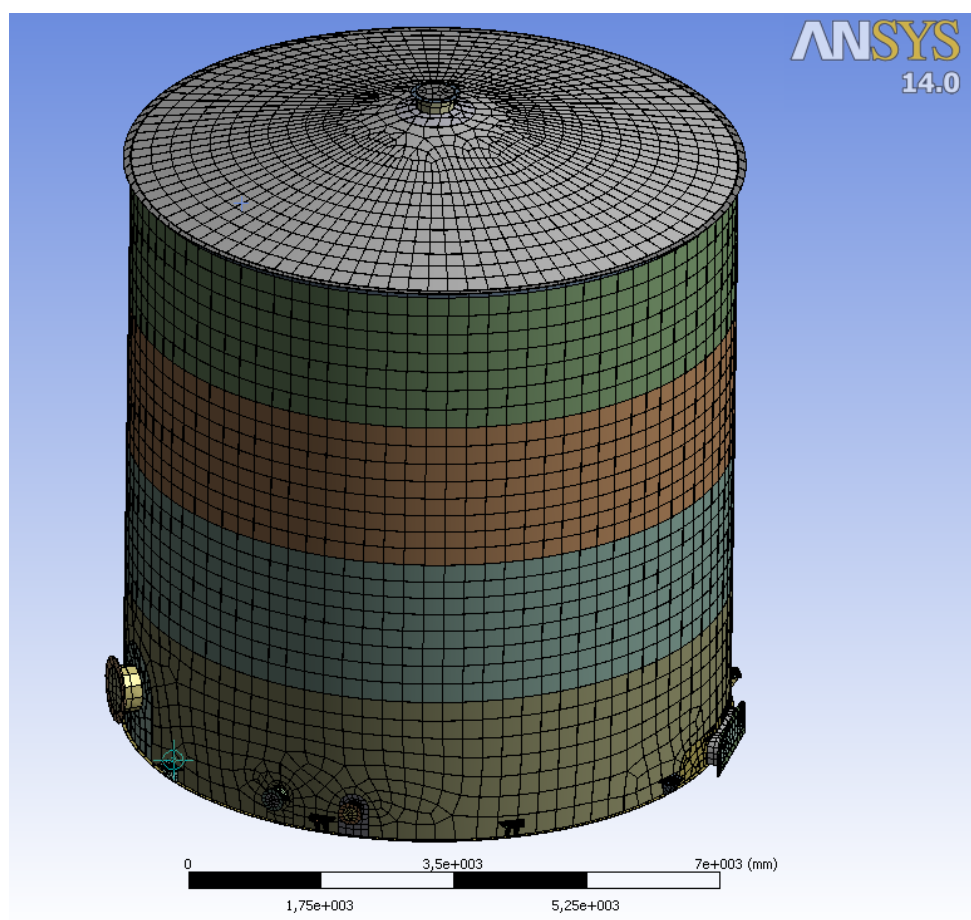
Obr. 1.1: Zadání tloušťky stěn pro model napětíové analýzy nádrže ve zkušebním stavu



Obr. 1.2: Zadání tloušťky stěn pro model napětíové analýzy nádrže v provozním stavu



*Obr. 1.3: Nasíťování výpočtového modelu pro napěťovou analýzu nádrže ve zkušebním stavu*



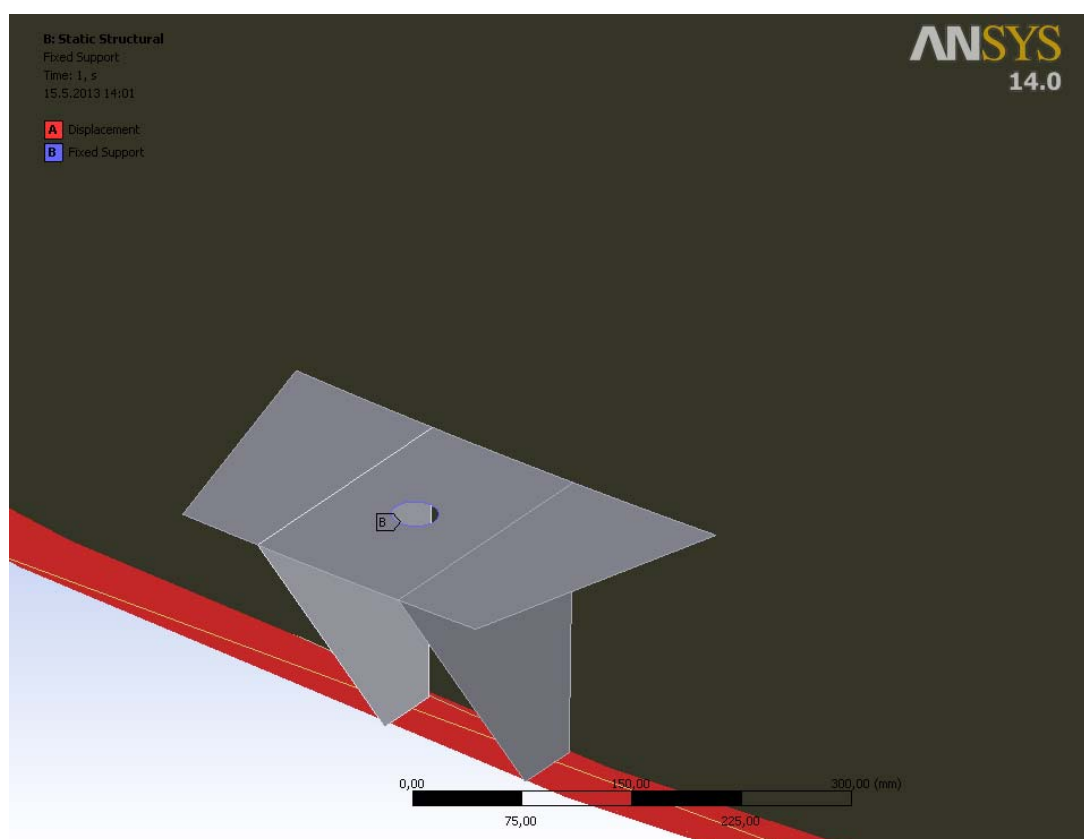
*Obr. 1.4: Nasíťování výpočtového modelu pro napěťovou analýzu nádrže v provozním stavu*



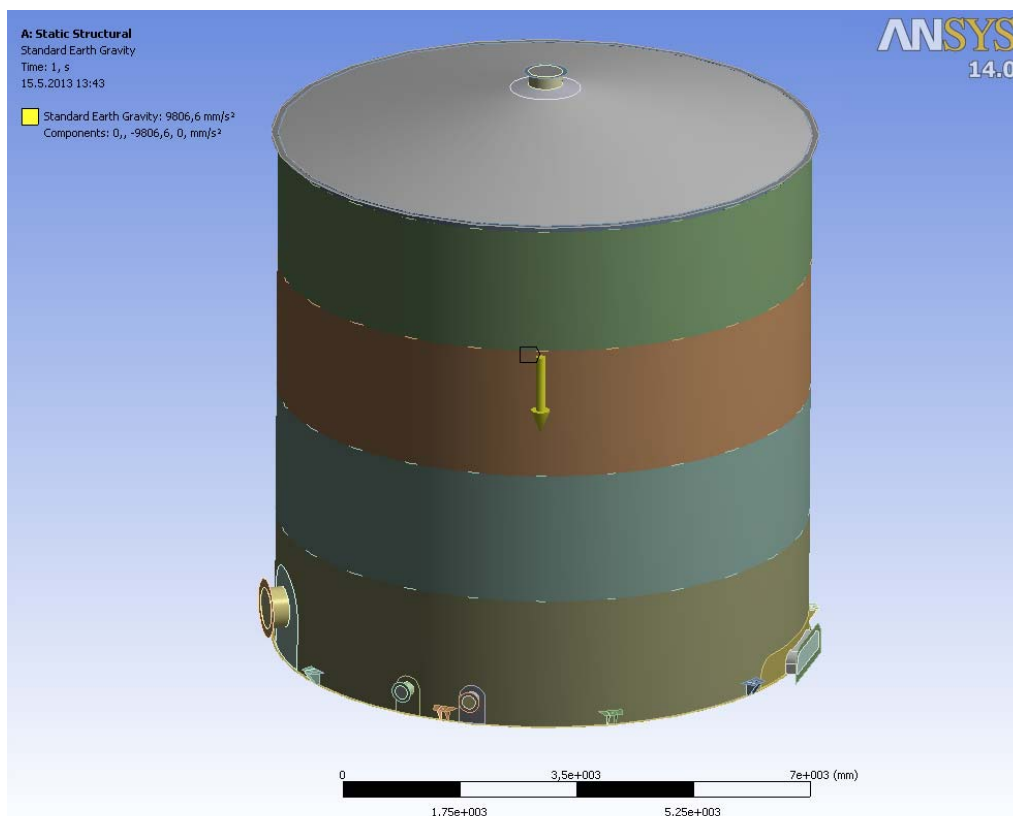
## Napětíová analýza

### Stav 1: Zkušební stav

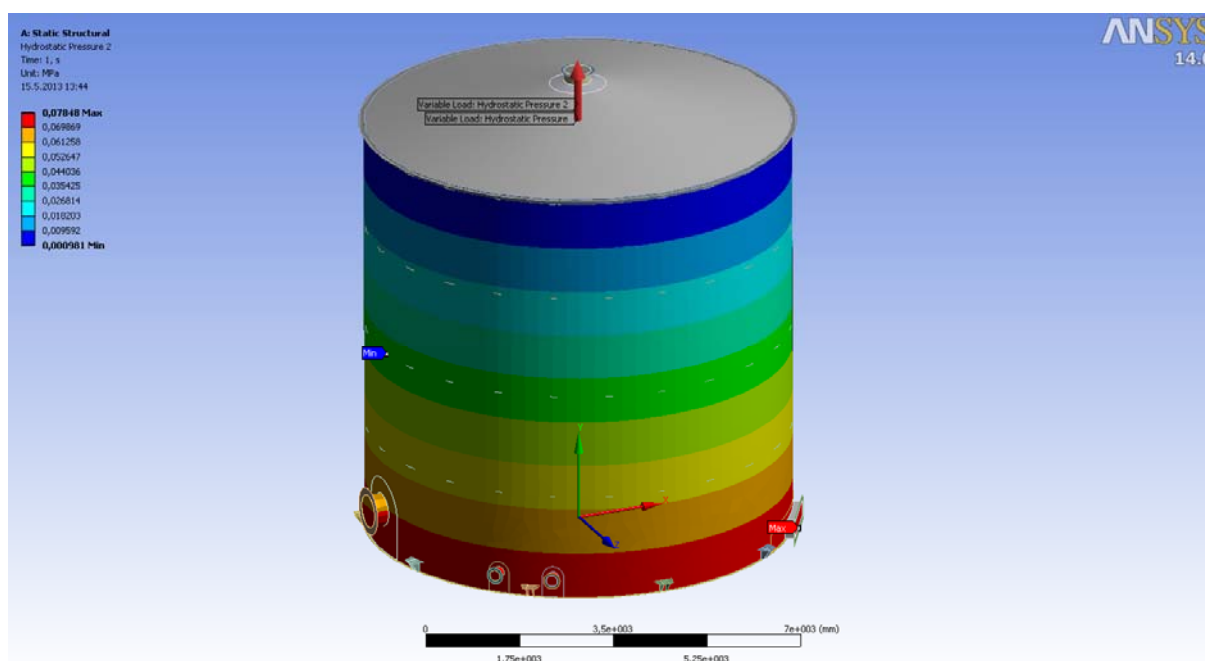
Cílem této analýzy bylo zjištění rozložení napětí ve střeše a plášti uskladňovací nádrže při pevnostní a těsnostní zkoušce. Jako okrajové podmínky byly zadány nulový posuv dna nádrže ve směru Y, a pevné přichycení děr pro šrouby na kotvách viz obr. 1.5. Dále bylo zadáno zatížení vlastní hmotností (obr. 1.6), hydrostatickým tlakem vně nádrže (obr.1.7), zkušebním tlakem v nádrži (obr.1.8).



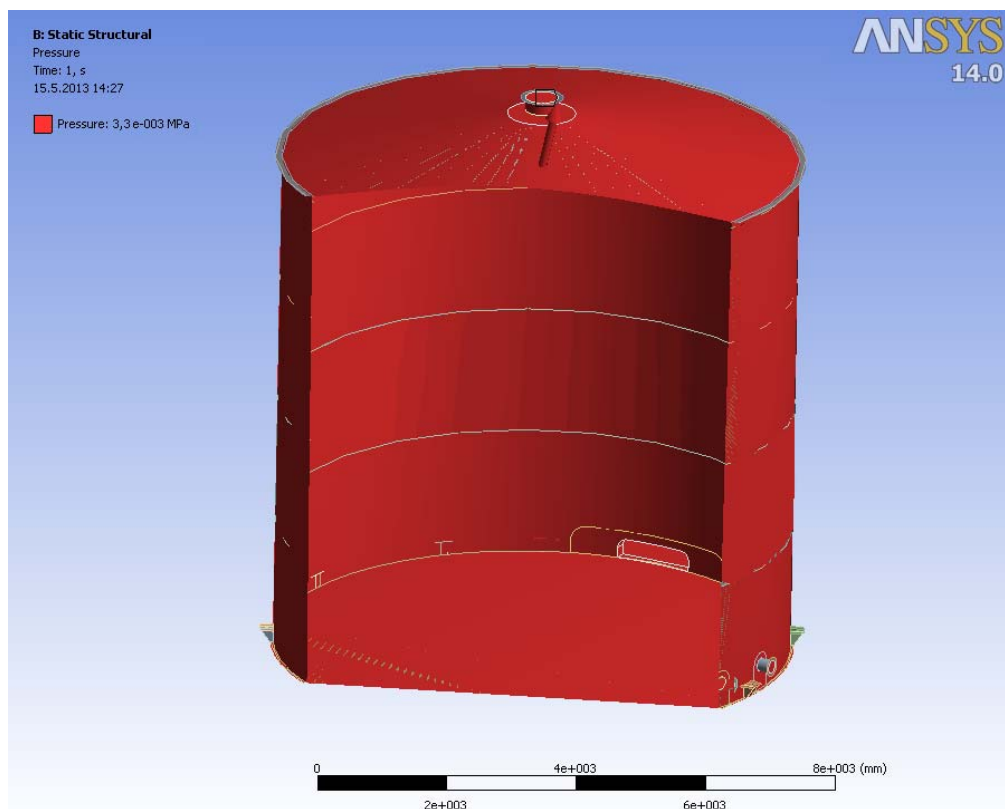
Obr. 1.5: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – omezení posuvu, pevné uchycení



Obr. 1.6: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – vlastní tíha



Obr. 1.7: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – hydrostatický tlak



*Obr. 1.8: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – tlak*

## Kategorizace napětí

Dovolené zkušební napětí

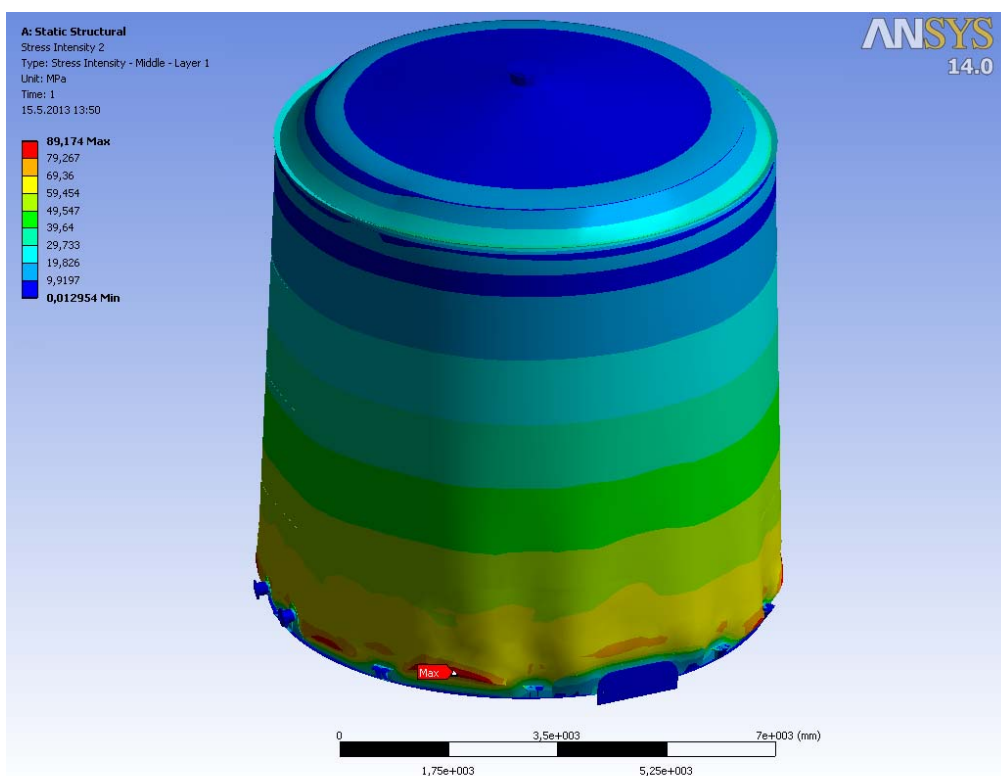
$$f_t = \min(0,75 \cdot R_e; 260)$$

$$f_t = \min(0,75 \cdot 235; 260)$$

$$f_t = 176,25 \text{ MPa}$$

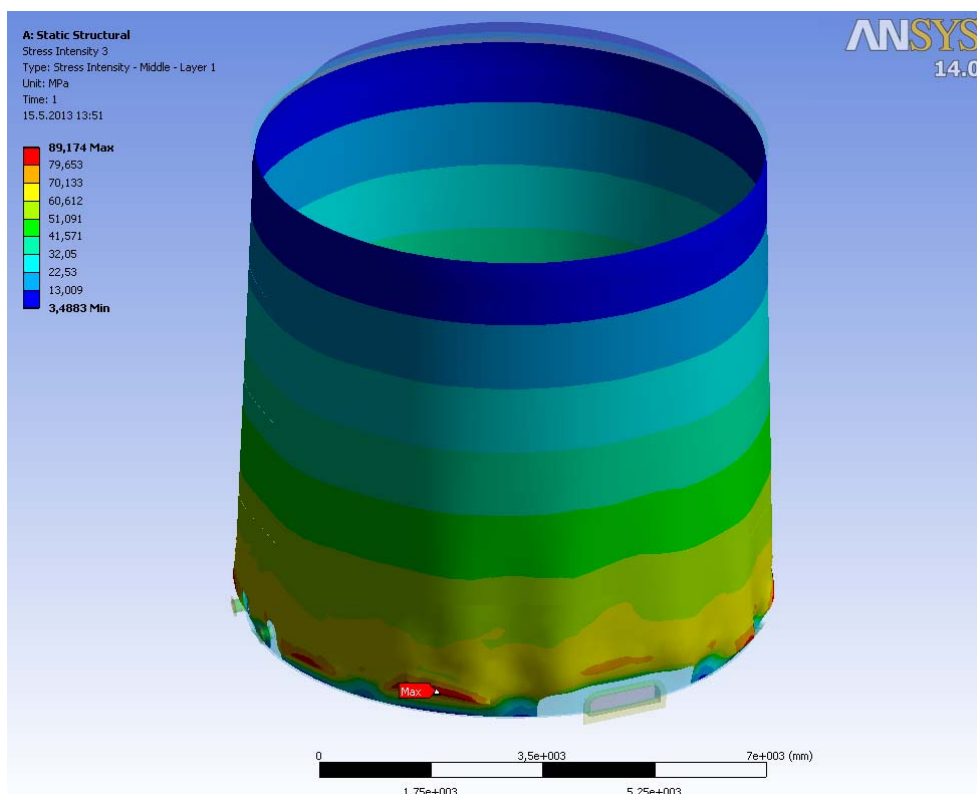
## Omezení ekvivalentních primárních napětí

- pro membránové napětí v celé nádrži viz obr. 1.9



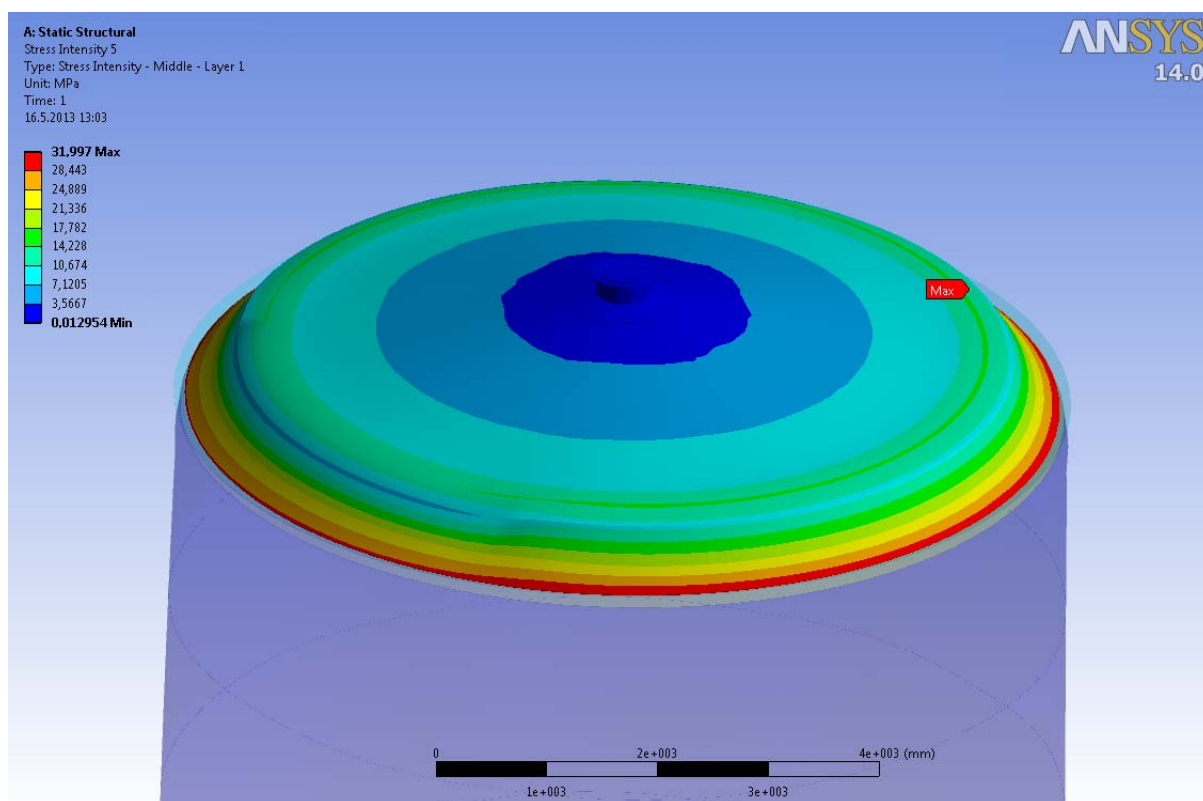
Obr. 1.9: Membránové napětí  $(\sigma)_1$

- pro membránové napětí na plášti viz obr. 1.10



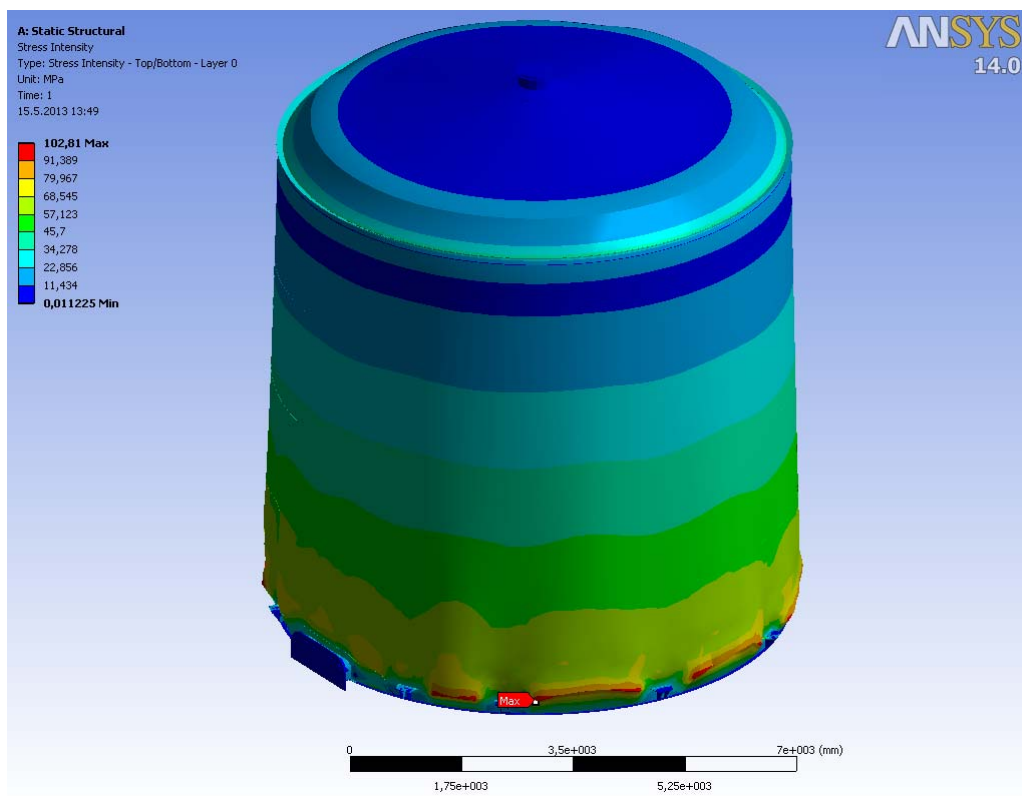
Obr. 1.10: Membránové napětí  $(\sigma)_1$  - plášť

- pro membránové napětí na střeše viz obr. 1.11



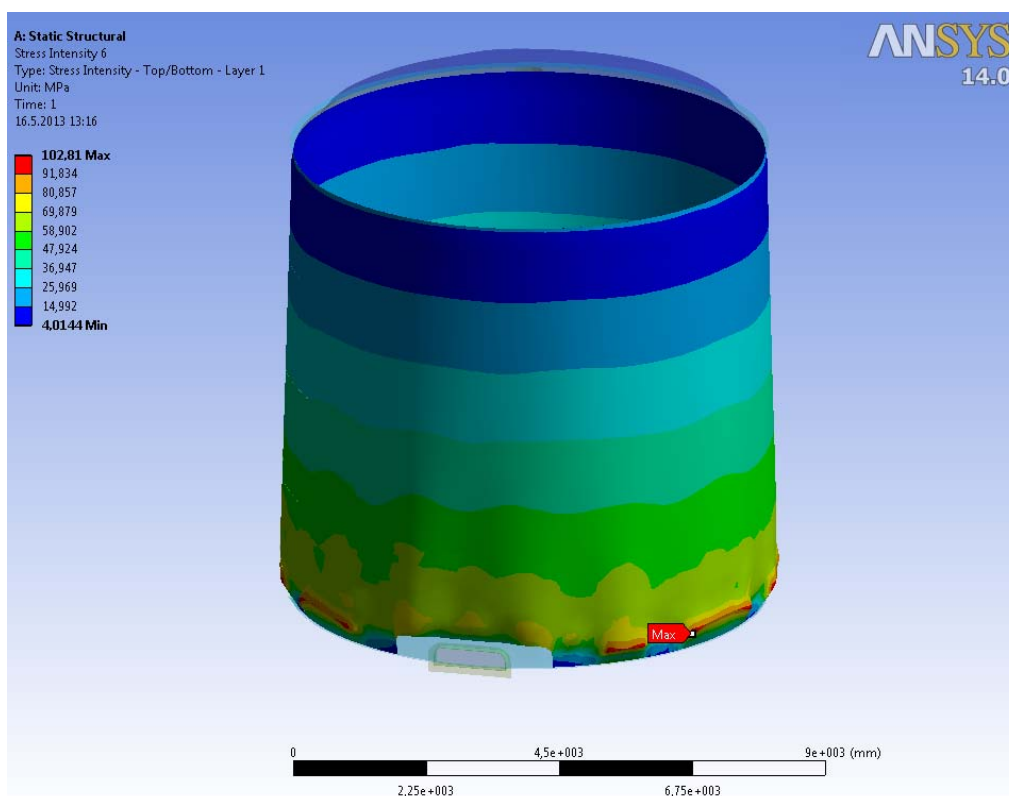
Obr. 3.11: Membránové napětí  $(\sigma)_1$  - střecha

- pro kombinaci membránové a ohybového napětí v celé nádrži viz obr. 1.12



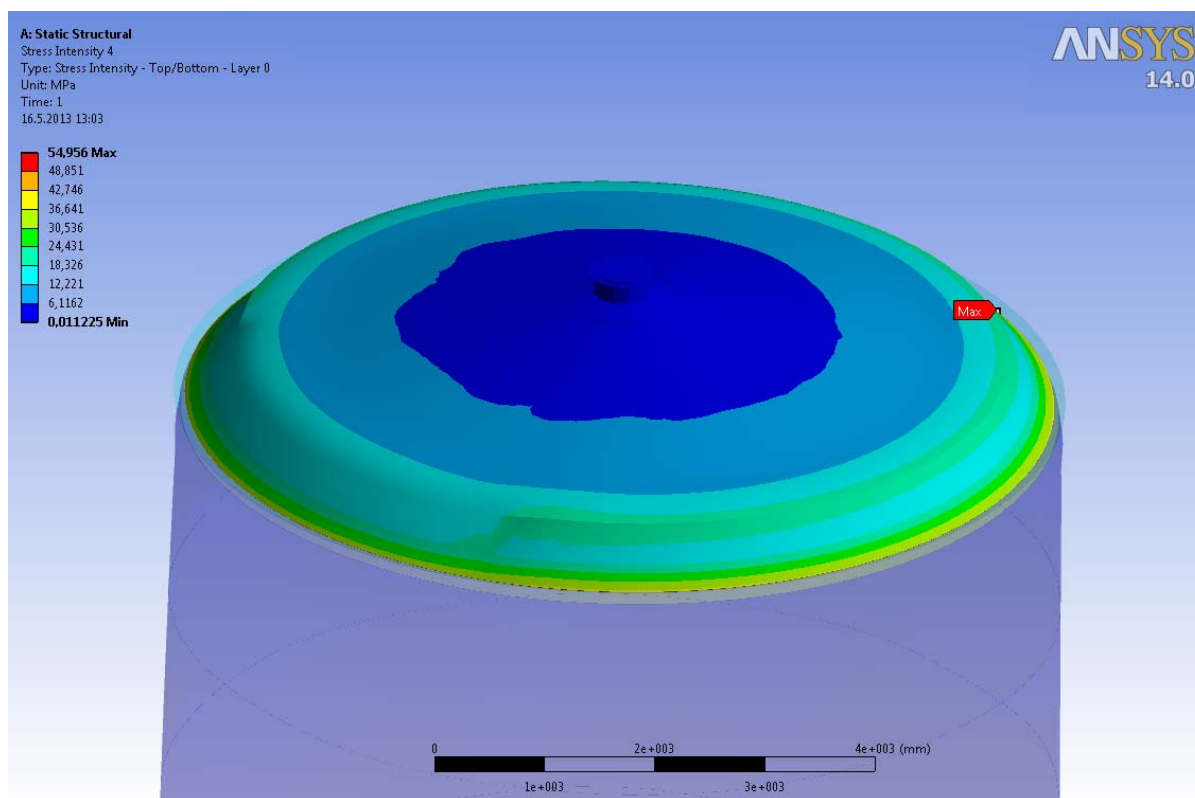
Obr. 1.12: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$

- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na plášti viz obr. 1.13



Obr. 1.13: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - plášť

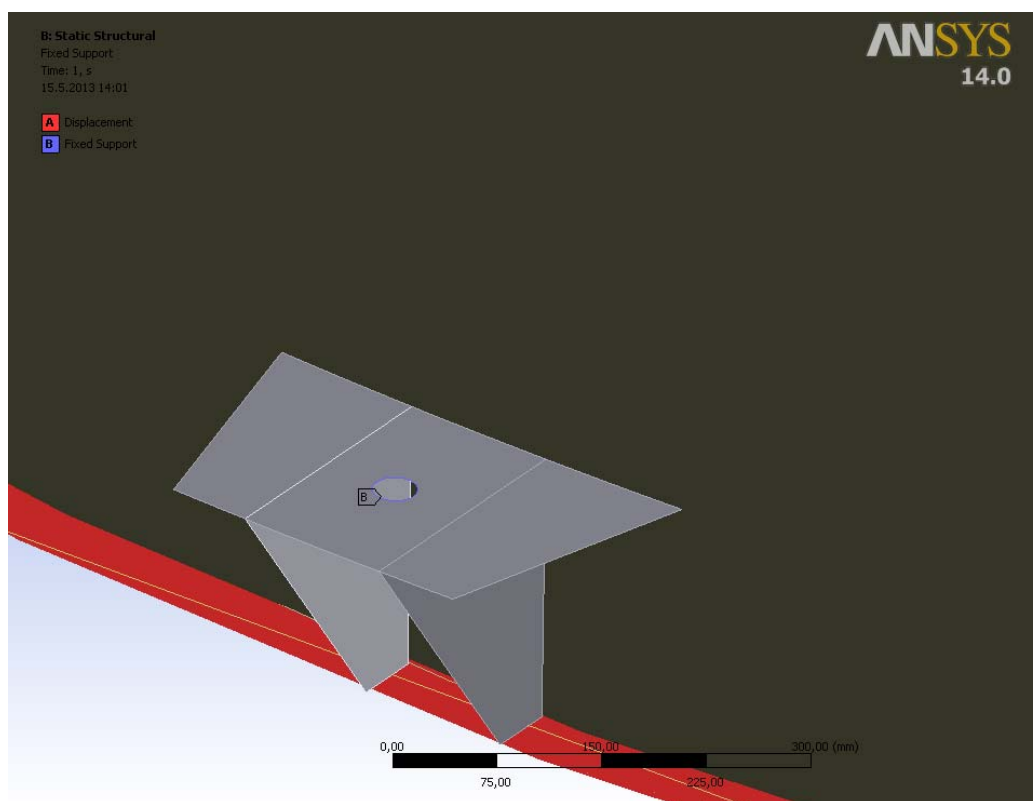
- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na střeše viz obr. 1.14



Obr.1.14: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - střeša

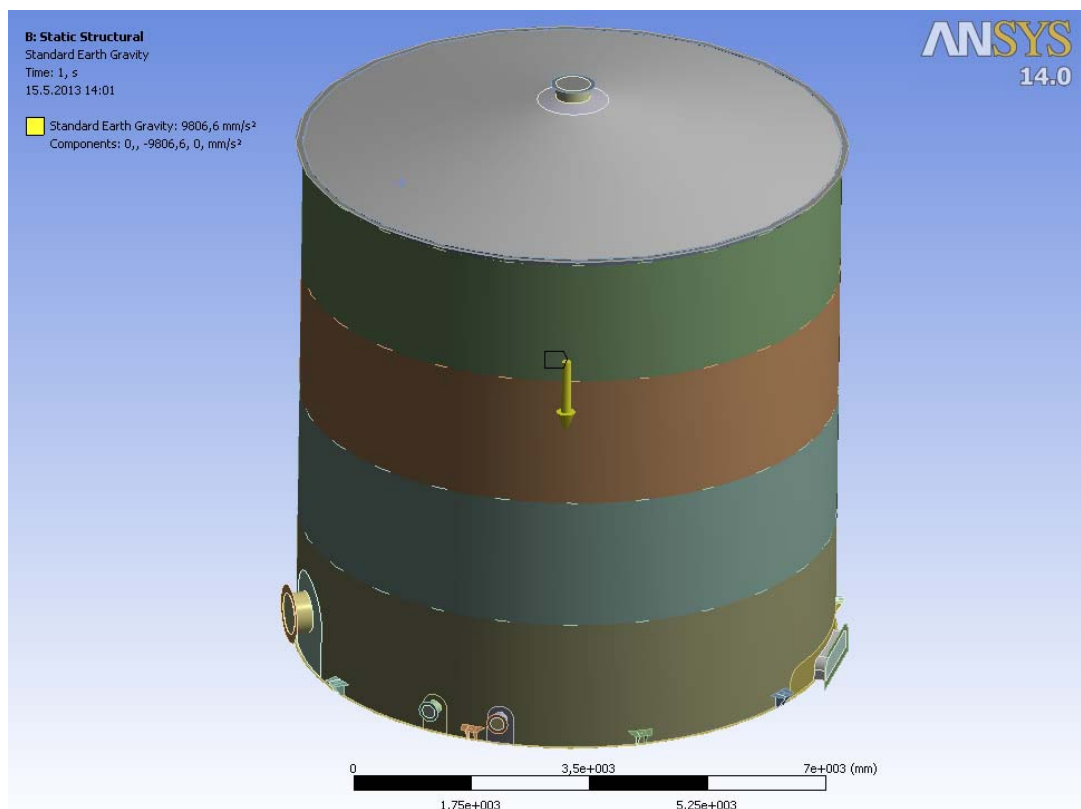
## Stav 2: Provozní stav – tlak v nádrži

Cílem této analýzy bylo zjištění rozložení napětí ve střeše a plášti uskladňovací nádrže při provozu, kdy je nádrž naplněna a v nádrži je max. dovolený tlak. Jako okrajové podmínky byly zadány nulový posuv dna nádrže ve směru Y, a pevné přichycení děr pro šrouby na kotvách viz obr. 3.15. Dále bylo zadáno zatížení vlastní hmotností (obr. 1.16), hydrostatickým tlakem vně nádrže (obr.1.17), provozní tlakem v nádrži (obr.1.18) a zatížení od sněhu (obr.1.19).

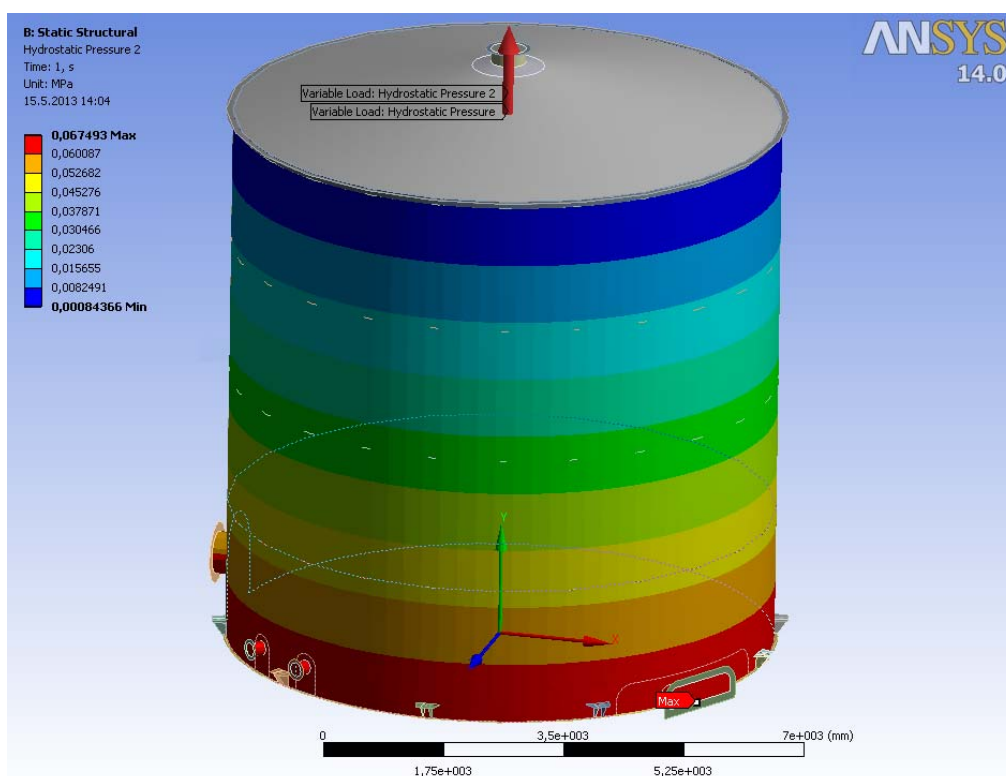


Obr. 1.15: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – omezení posuvu, pevné uchycení



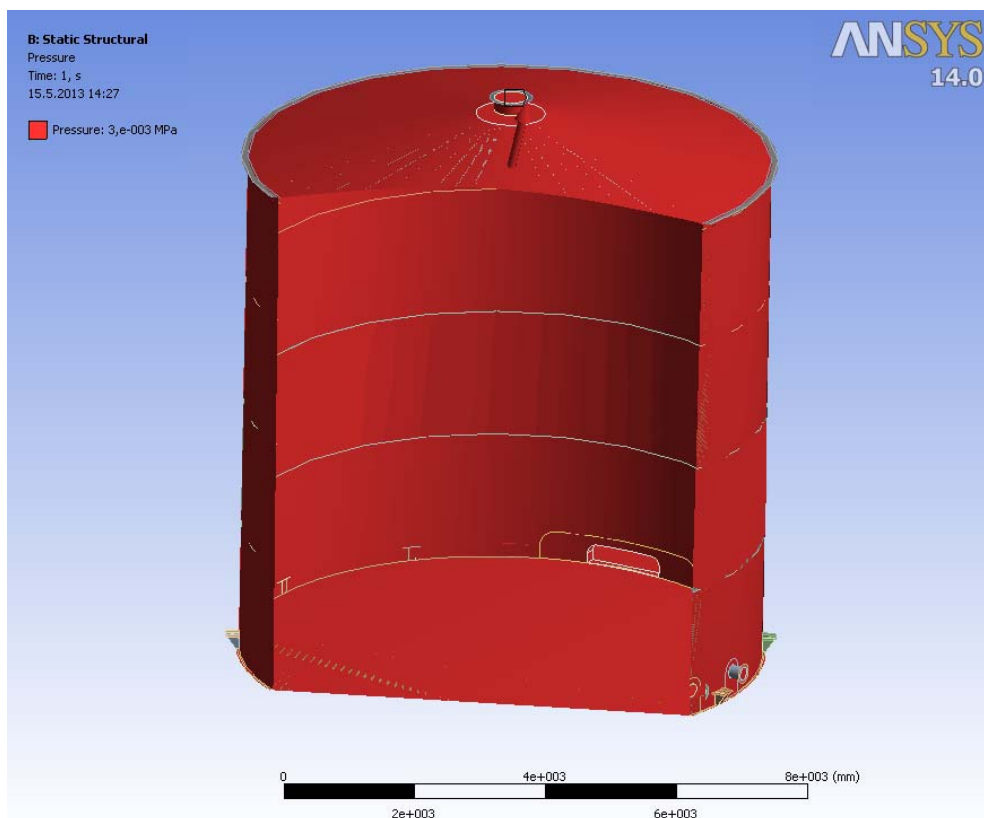


Obr. 1.16: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – vlastní tíhy

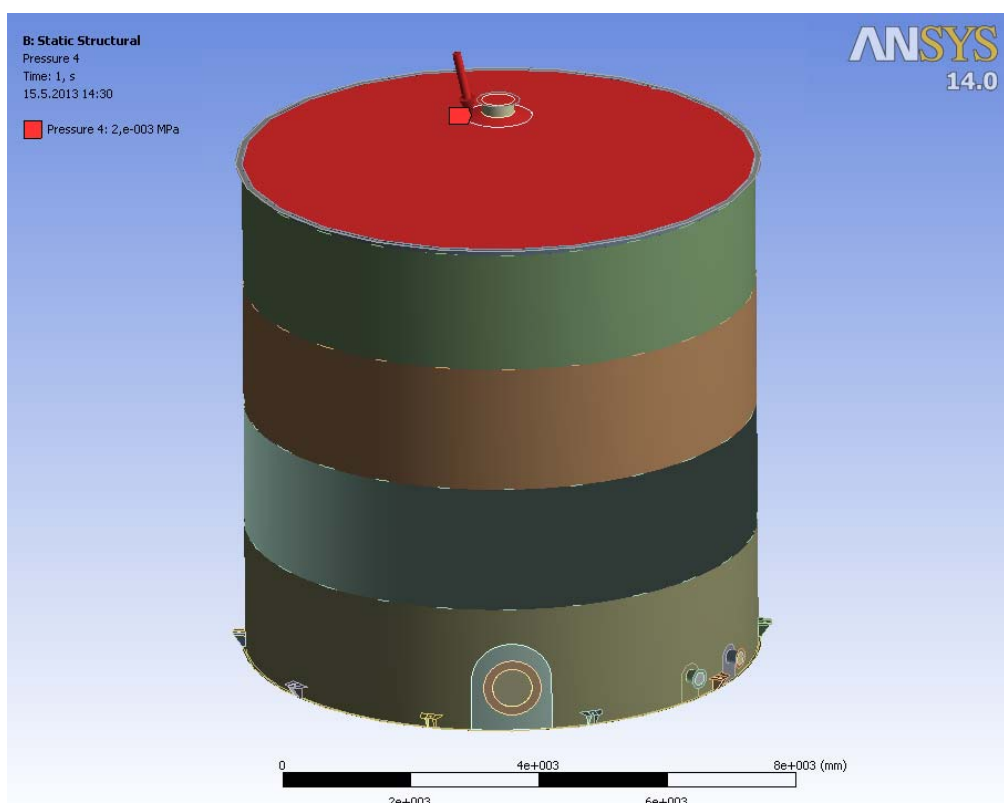


Obr. 1.17: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – hydrostatický tlak





Obr. 1.18: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – provozní tlak



Obr. 1.19: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – zatížení sněhem

## Kategorizace napětí

Dovolené provozní napětí

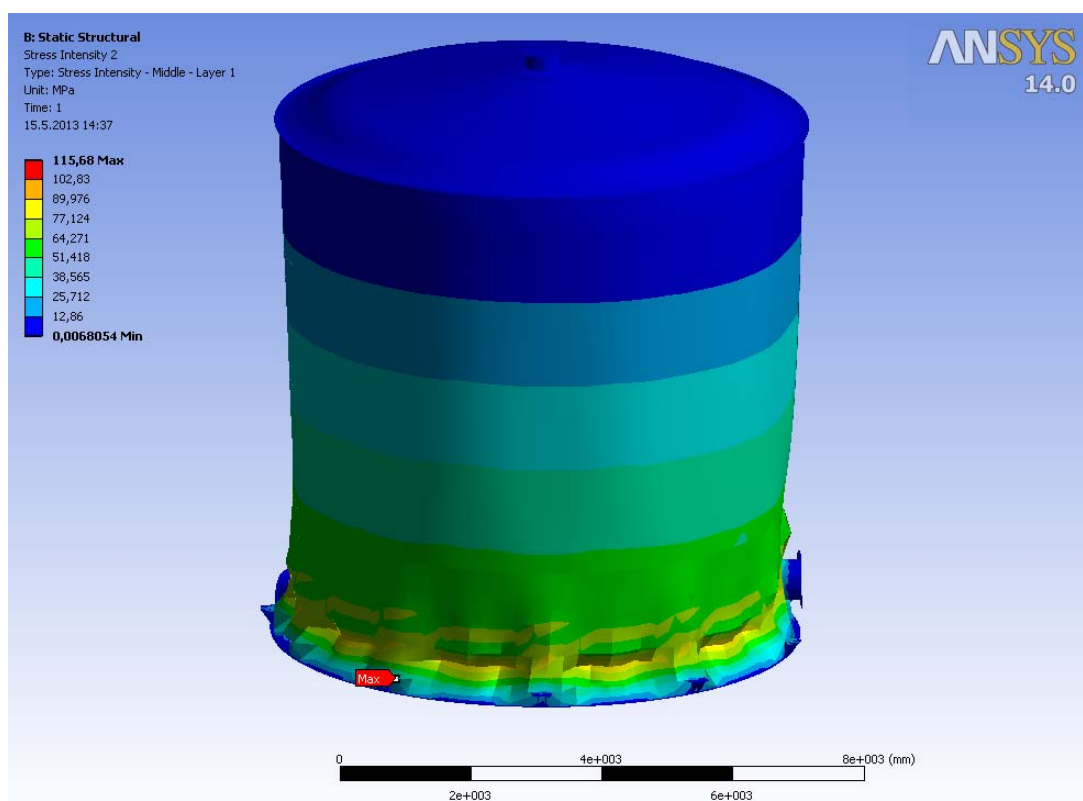
$$f = \min\left(\frac{2}{3} \cdot R_e; 260\right)$$

$$f = \min\left(\frac{2}{3} \cdot 235; 260\right)$$

$$f = 156,667 \text{ MPa}$$

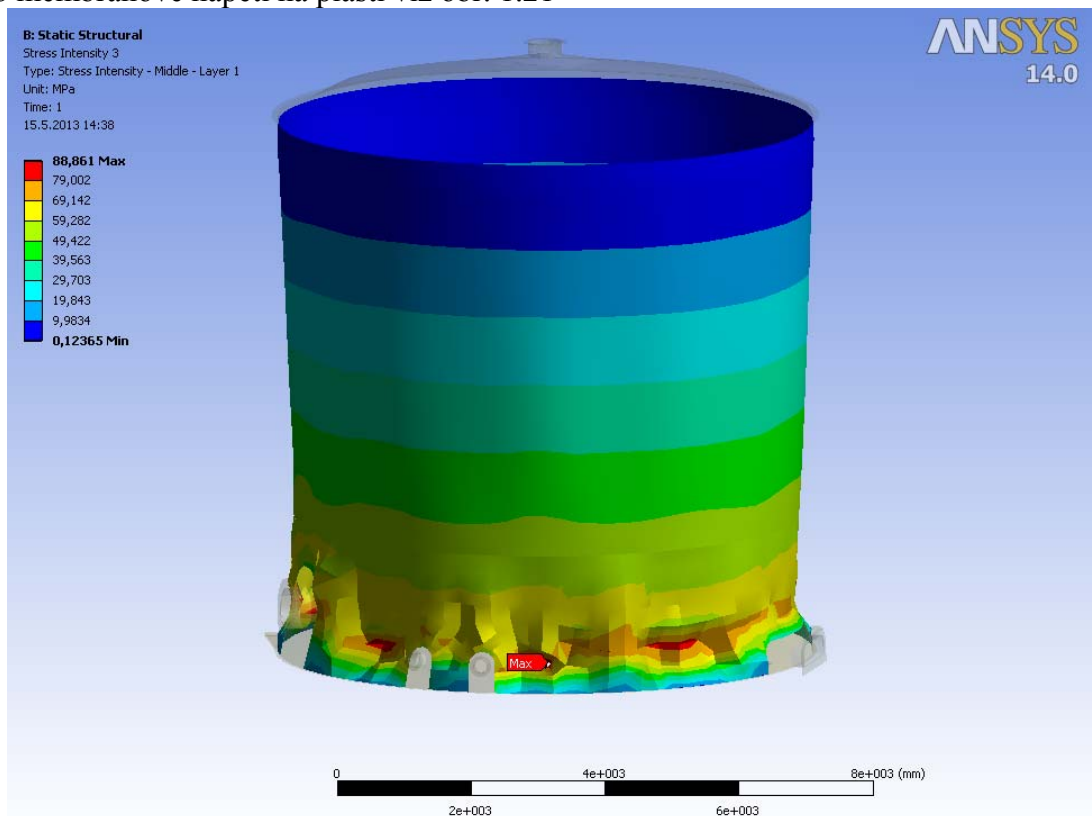
## Omezení ekvivalentních primárních napětí

- pro membránové napětí v celé nádrži viz obr. 1.20



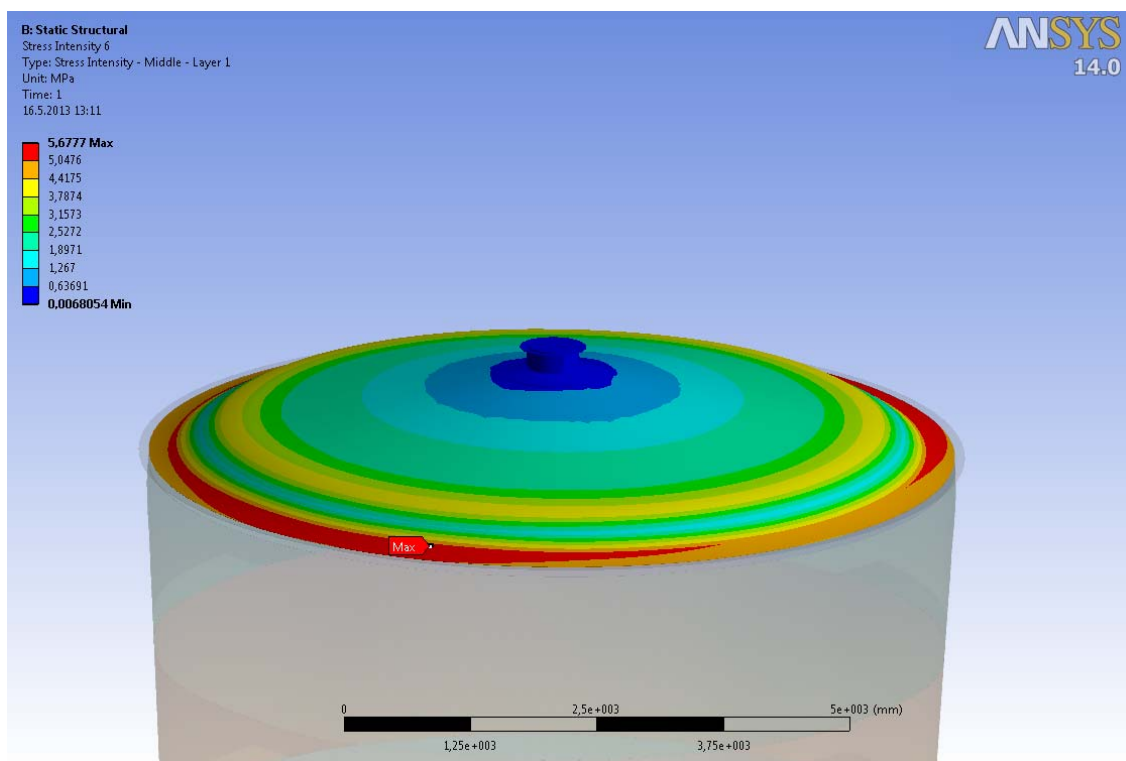
Obr. 1.20: Membránové napětí  $(\sigma)_1$

- pro membránové napětí na plášti viz obr. 1.21



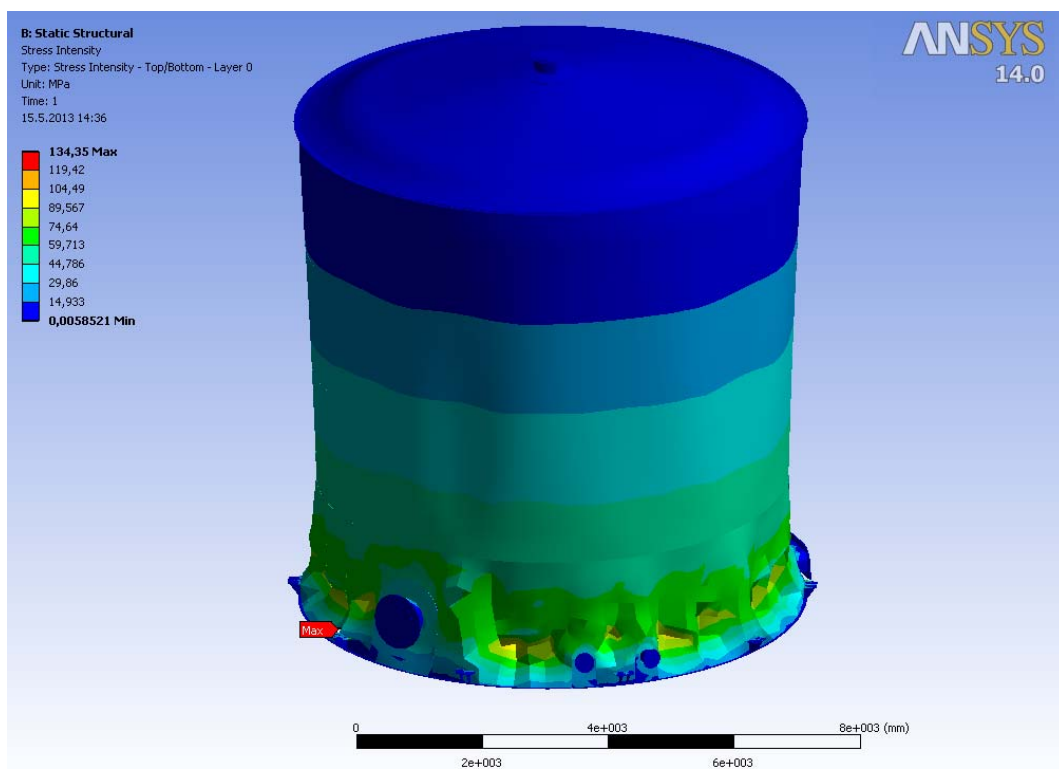
Obr. 1.21: Membránové napětí  $(\sigma)_1$  - plášť

- pro membránové napětí na střeše viz obr. 1.22



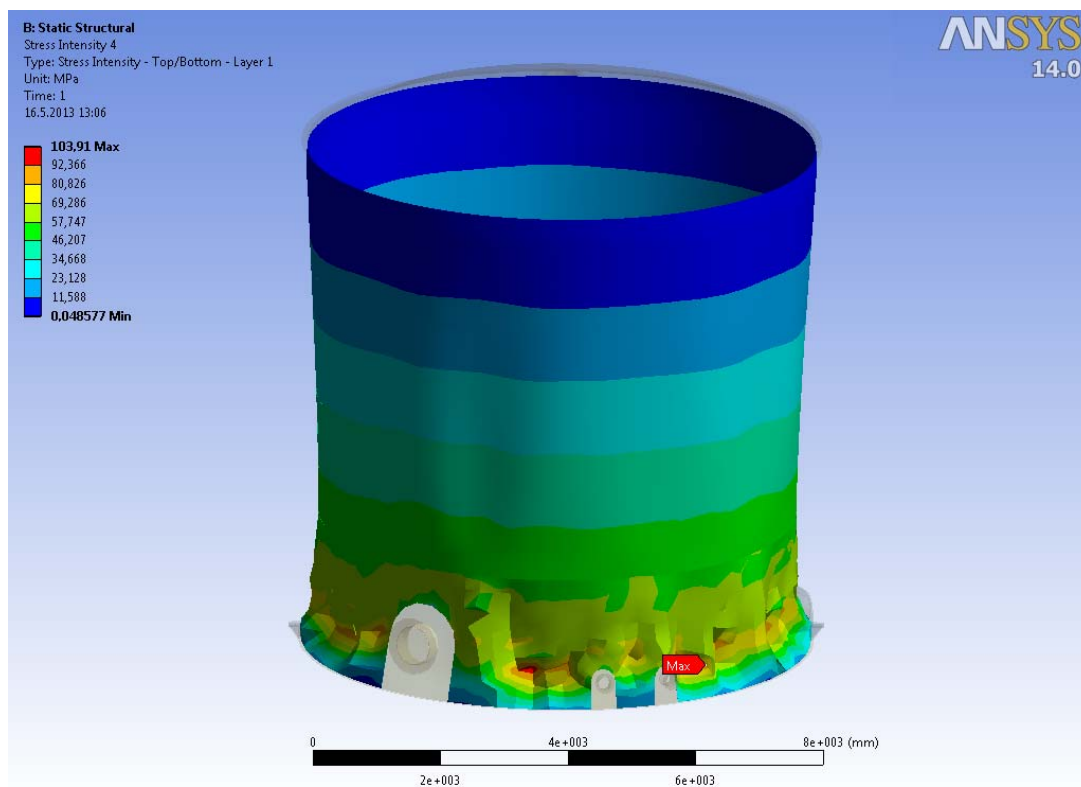
Obr. 1.22: Membránové napětí  $(\sigma)_1$  - střecha

- pro kombinaci membránové a ohybového napětí v celé nádrži viz obr. 1.23



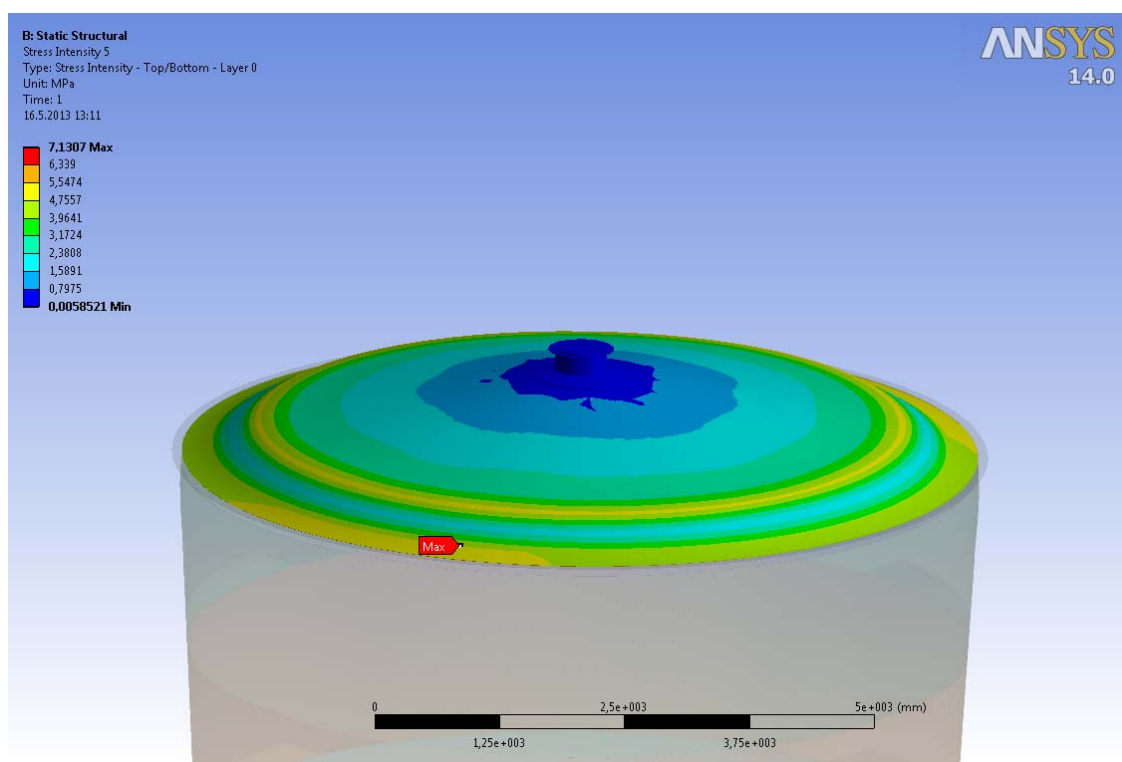
Obr. 1.23: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$

- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na plášti viz obr. 1.24



Obr. 1.24: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - plášť

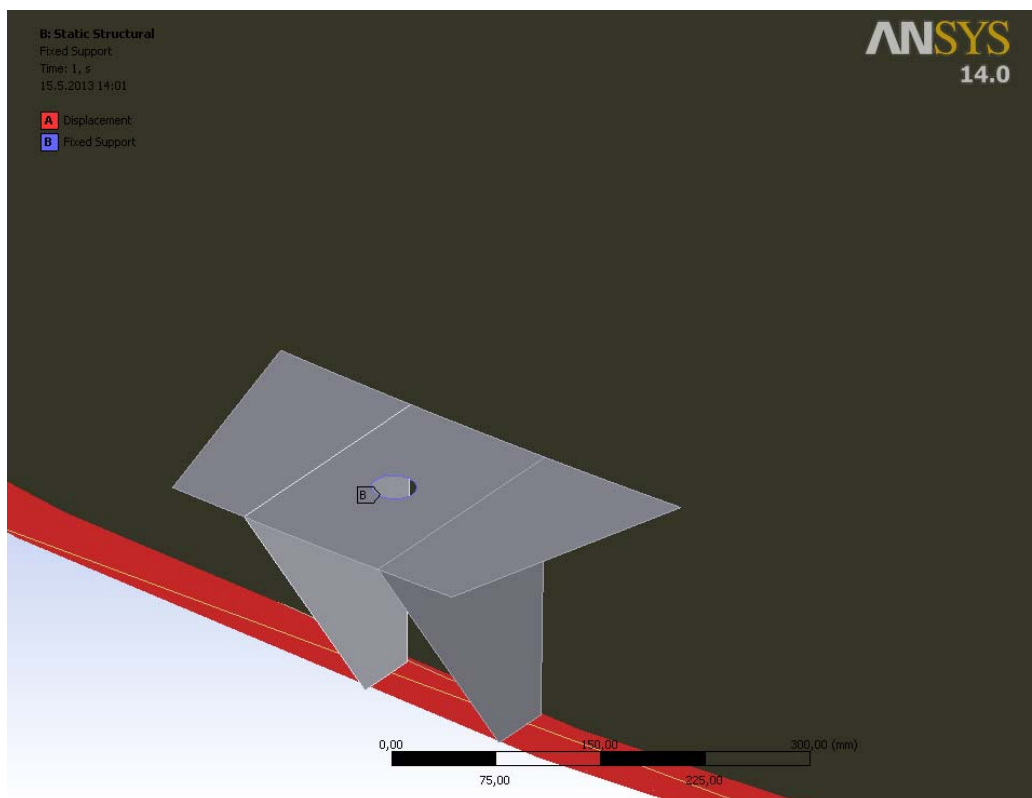
- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na střeše viz obr. 1.25



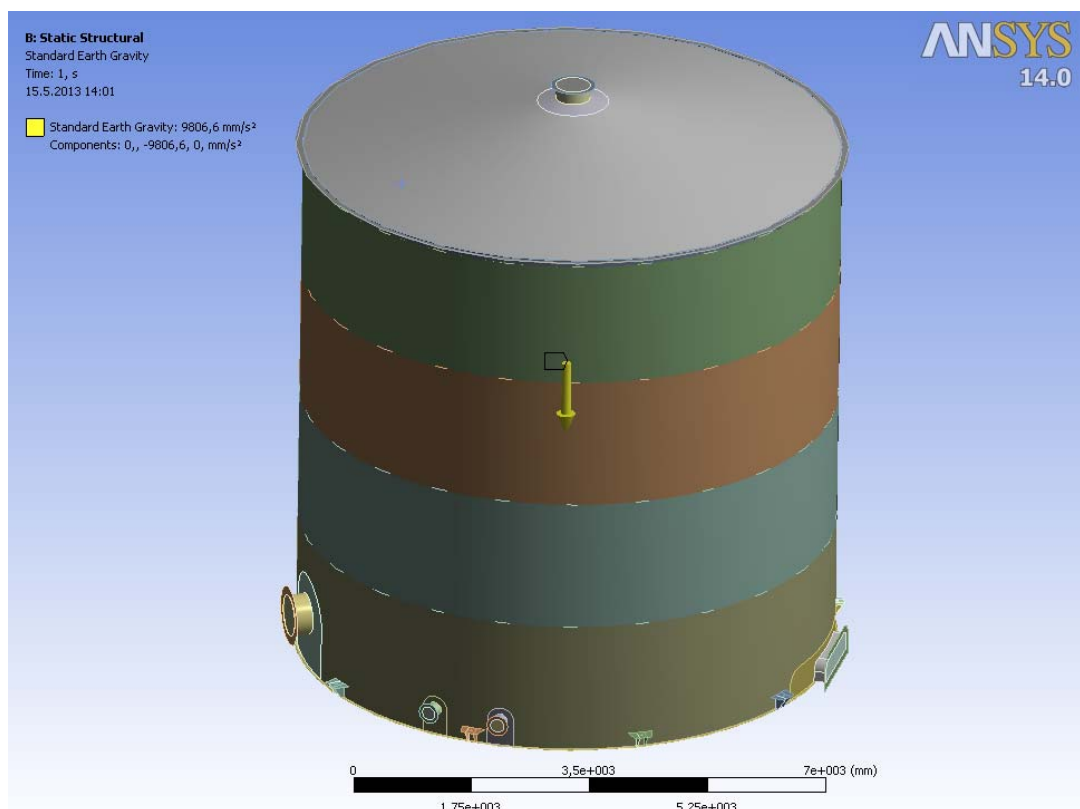
Obr. 1.25: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - střecha

### Stav 3: Provozní stav – podtlak v nádrži

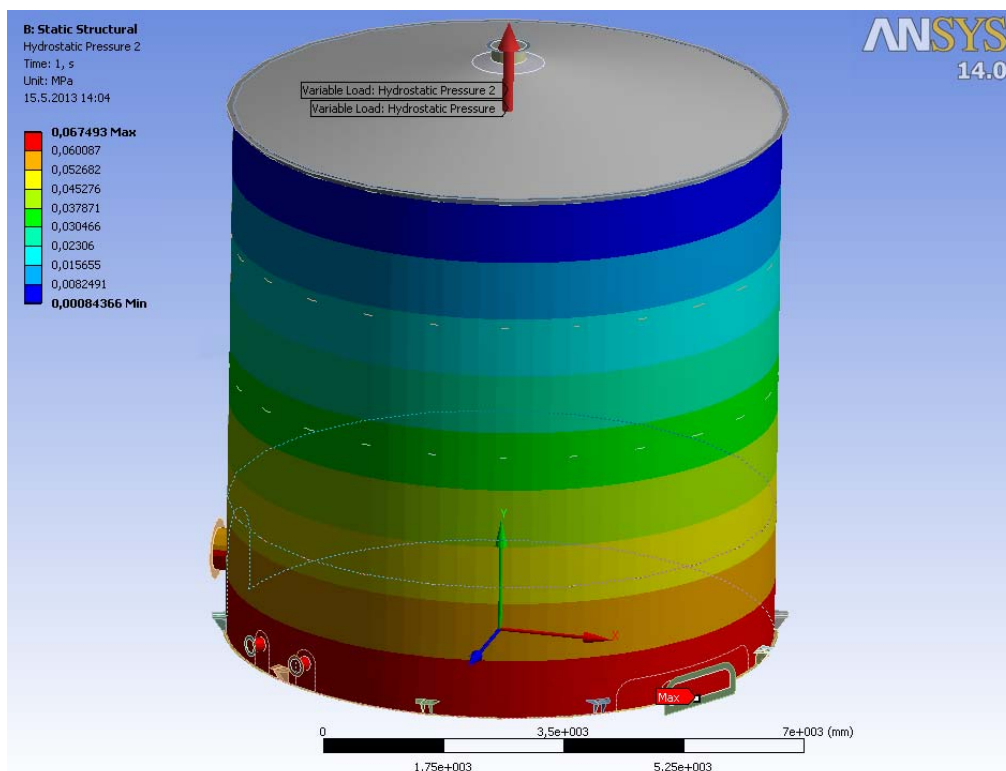
Cílem této analýzy bylo zjištění rozložení napětí ve střeše a plášti uskladňovací nádrže při provozu, kdy je nádrž naplněna a v nádrži je max. dovolený podtlak. Jako okrajové podmínky byly zadány nulový posuv dna nádrže ve směru Y, a pevné přichycení děr pro šrouby na kotvách viz obr. 1.26. Dále bylo zadáno zatížení vlastní hmotností (obr. 1.27), hydrostatickým tlakem vně nádrže (obr. 1.28), provozním podtlakem v nádrži (obr. 1.29) a zatížení od sněhu (obr. 1.30).



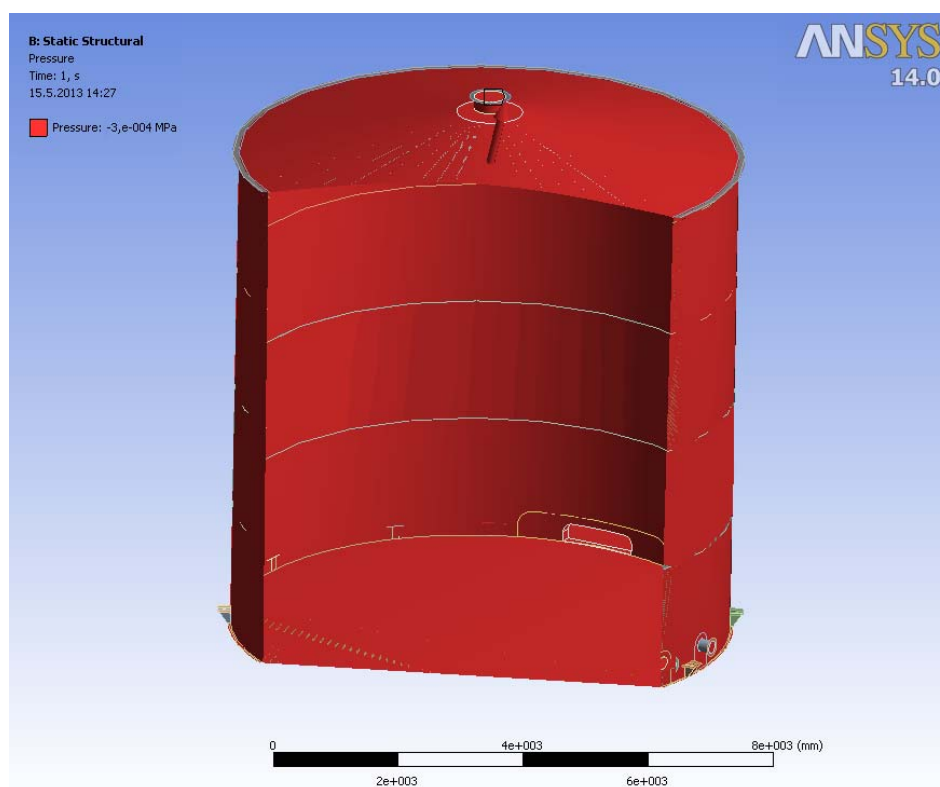
Obr. 1.26: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – omezení posuvu, pevné uchycení



Obr. 1.27: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – vlastní tíhy

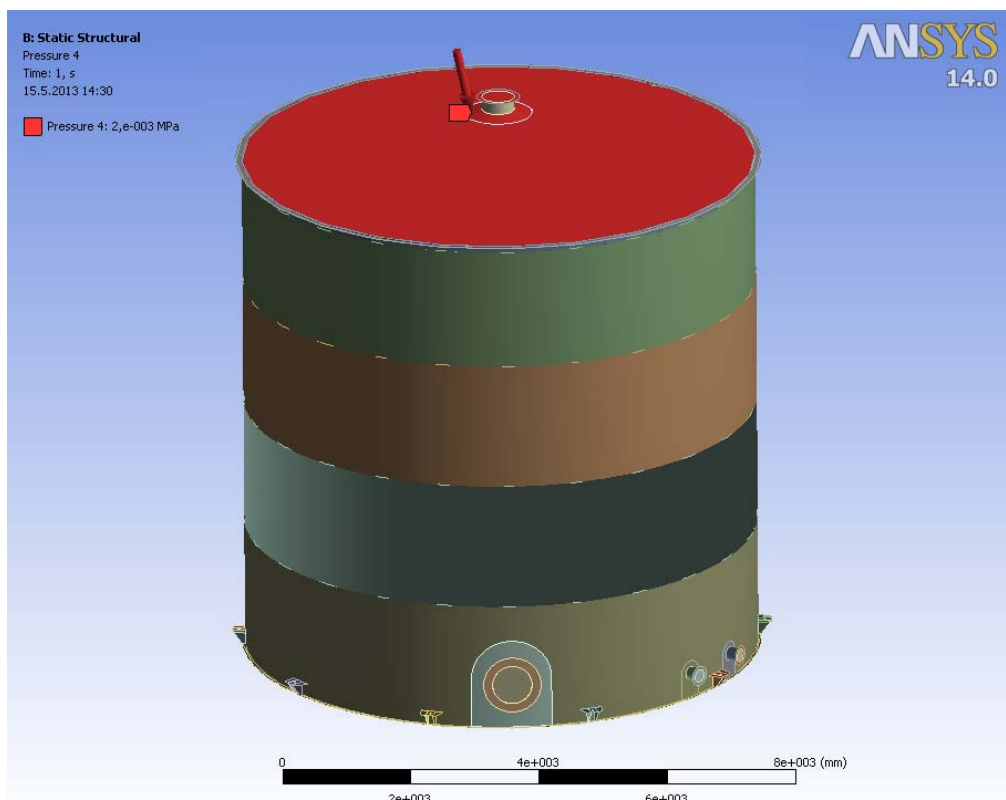


Obr. 1.28: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – hydrostatický tlak



Obr. 1.29: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – provozní podtlak





*Obr. 1.30: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – zatížení sněhem*

## Kategorizace napětí

Dovolené provozní napětí

$$f = \min\left(\frac{2}{3} \cdot R_e; 260\right)$$

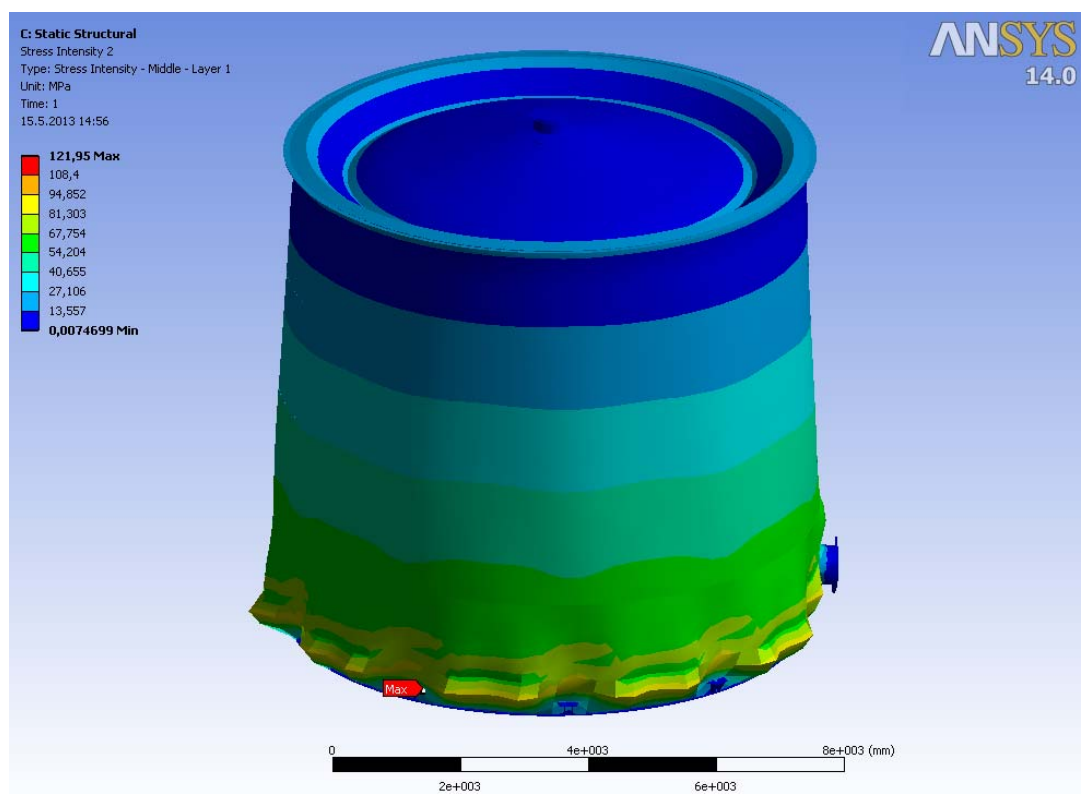
$$f = \min\left(\frac{2}{3} \cdot 235; 260\right)$$

$$f = 156,667 \text{ MPa}$$

## Omezení ekvivalentních primárních napětí

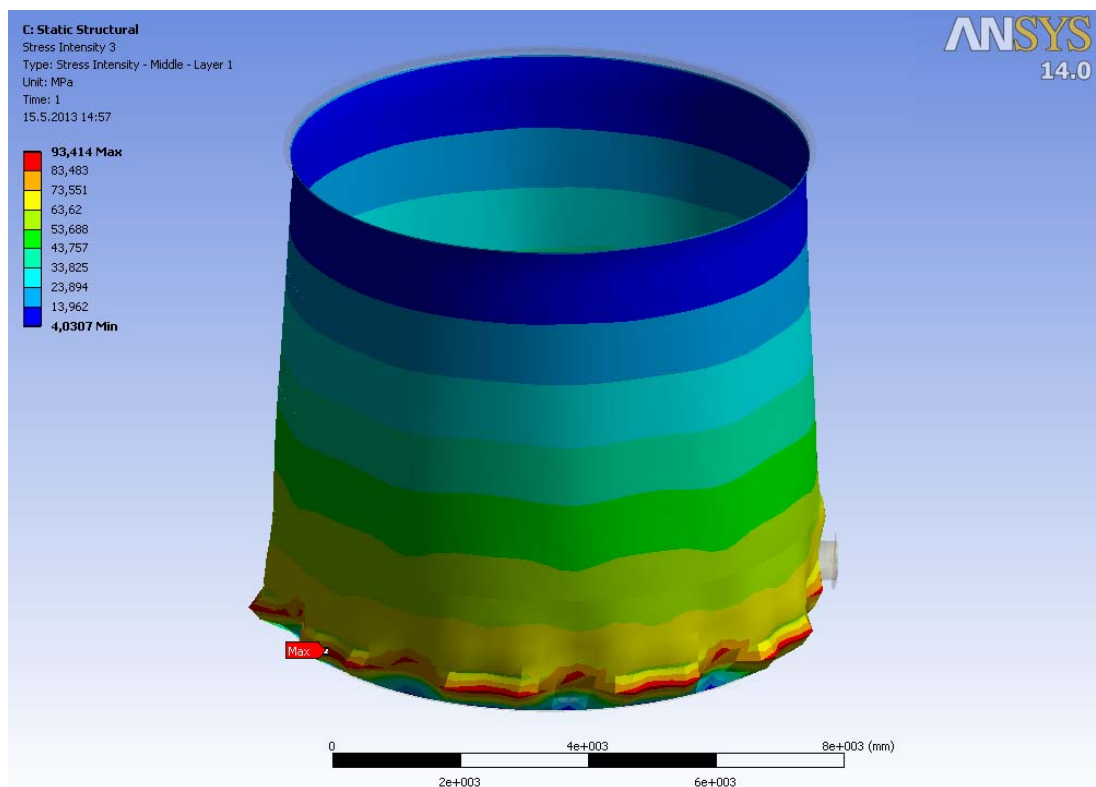


- pro membránové napětí v celé nádrži viz obr. 1.31



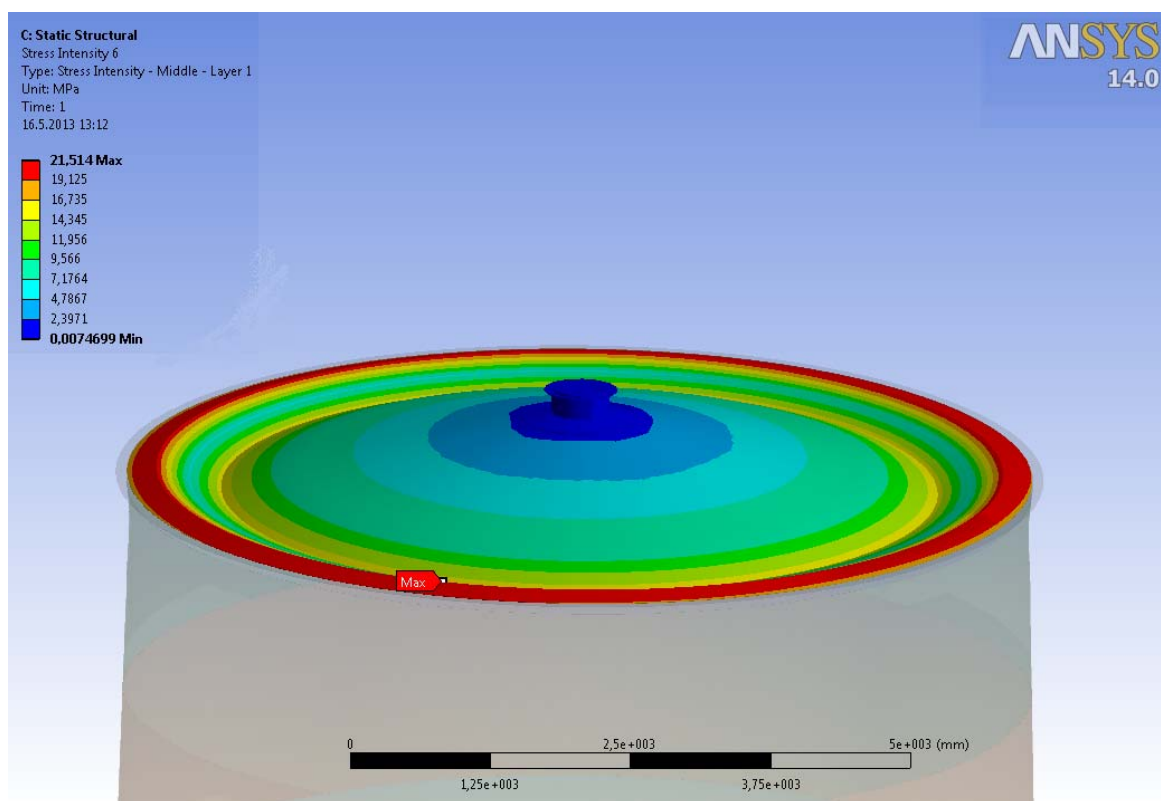
Obr. 1.31: Membránové napětí  $(\sigma)_1$

- pro membránové napětí na plášti viz obr. 1.32



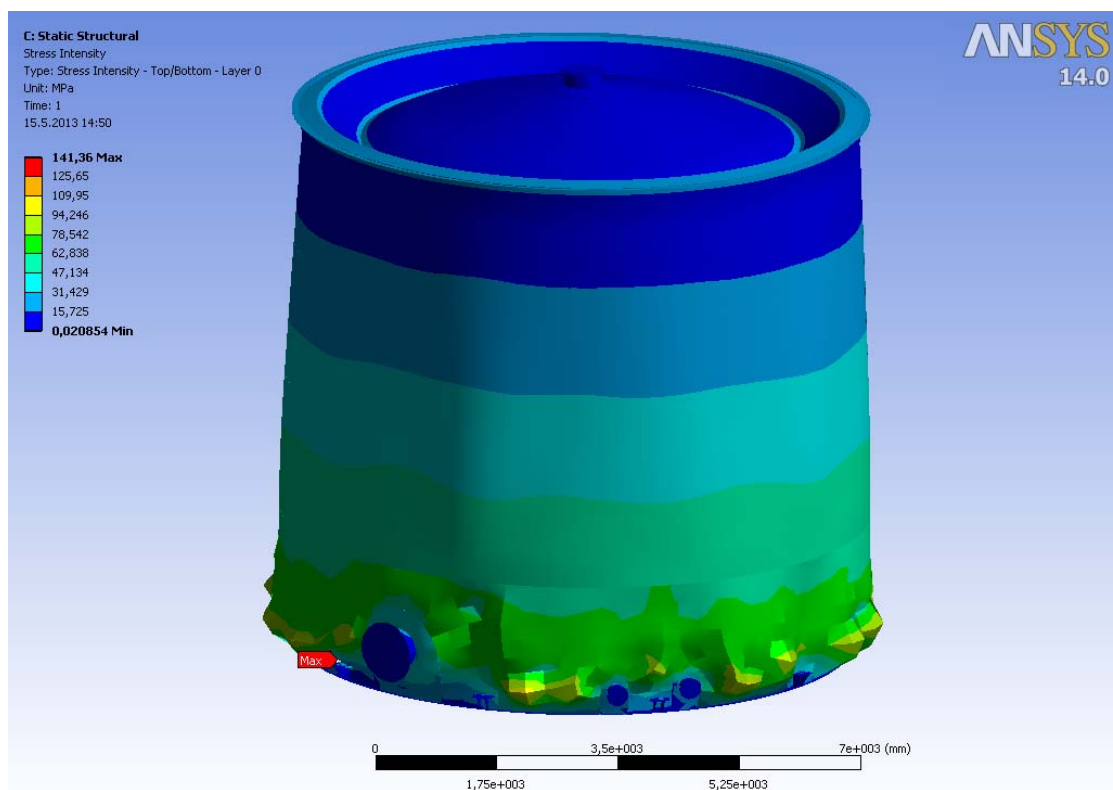
Obr. 1.32: Membránové napětí  $(\sigma)_1$  - plášť

- pro membránové napětí na střeše viz obr. 1.33



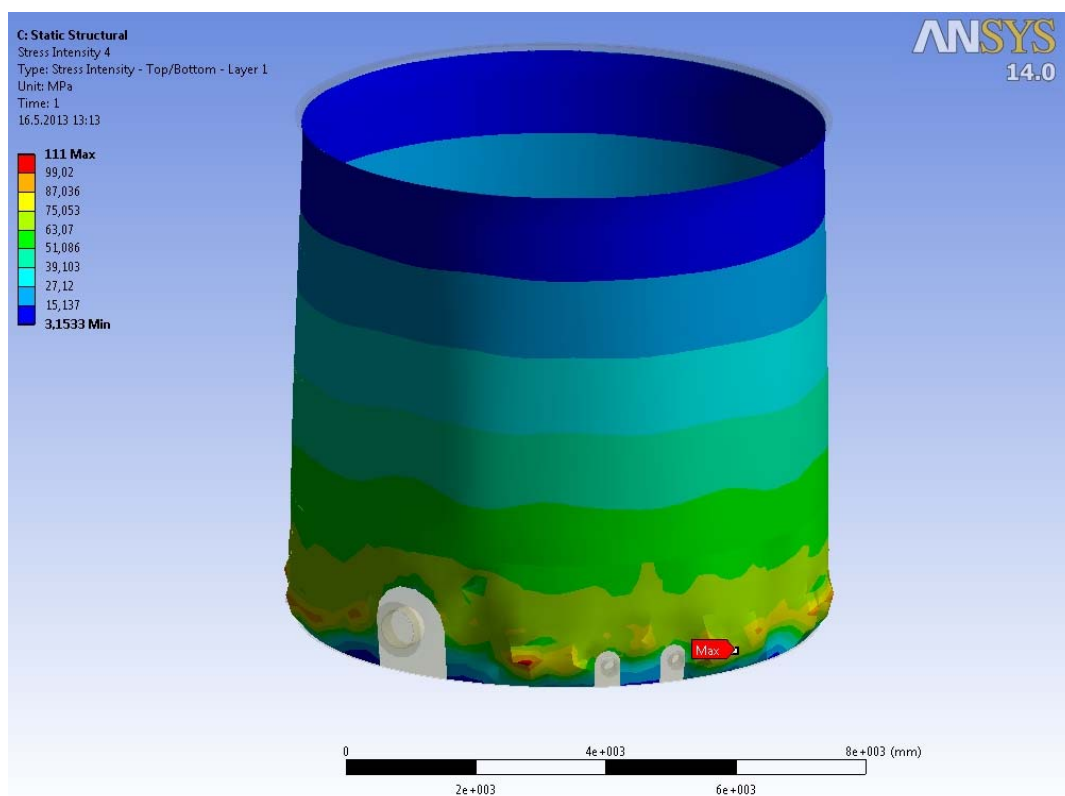
Obr. 1.33: Membránové napětí  $(\sigma)_1$  - střeška

- pro kombinaci membránové a ohybového napětí v celé nádrži viz obr. 1.34



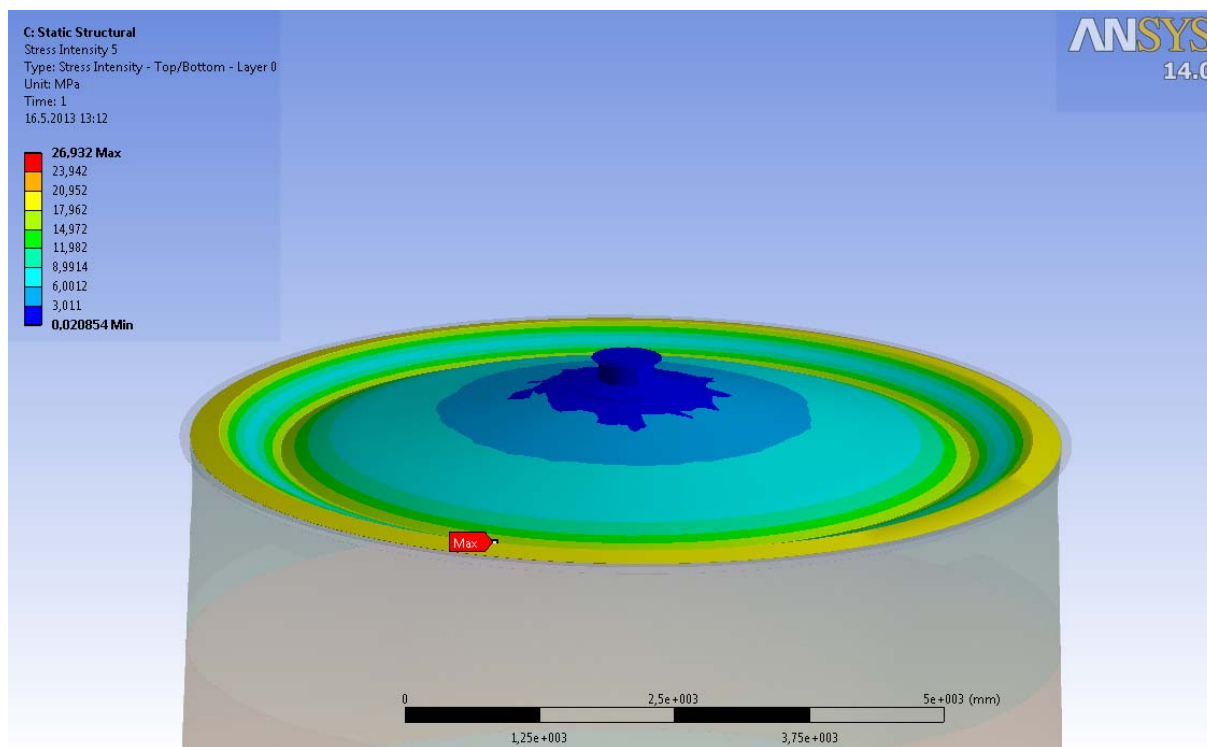
Obr. 3.34: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$

- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na plášti viz obr. 1.35



Obr. 1.35: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - plášť

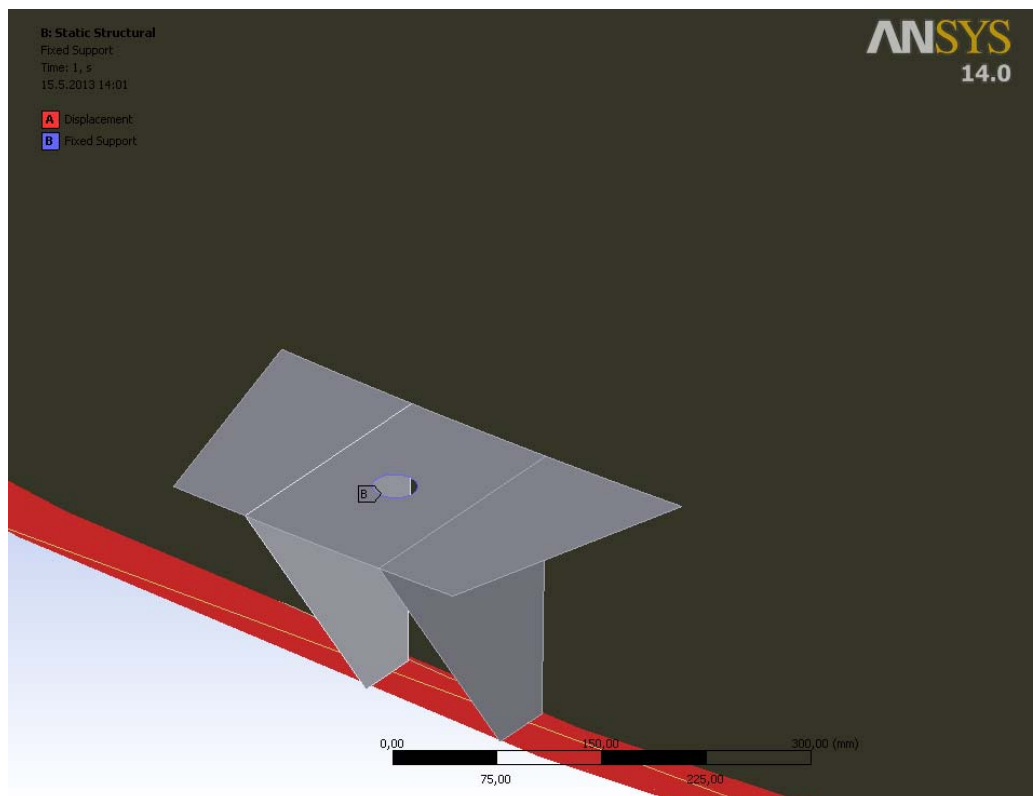
- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na střeše viz obr. 1.36



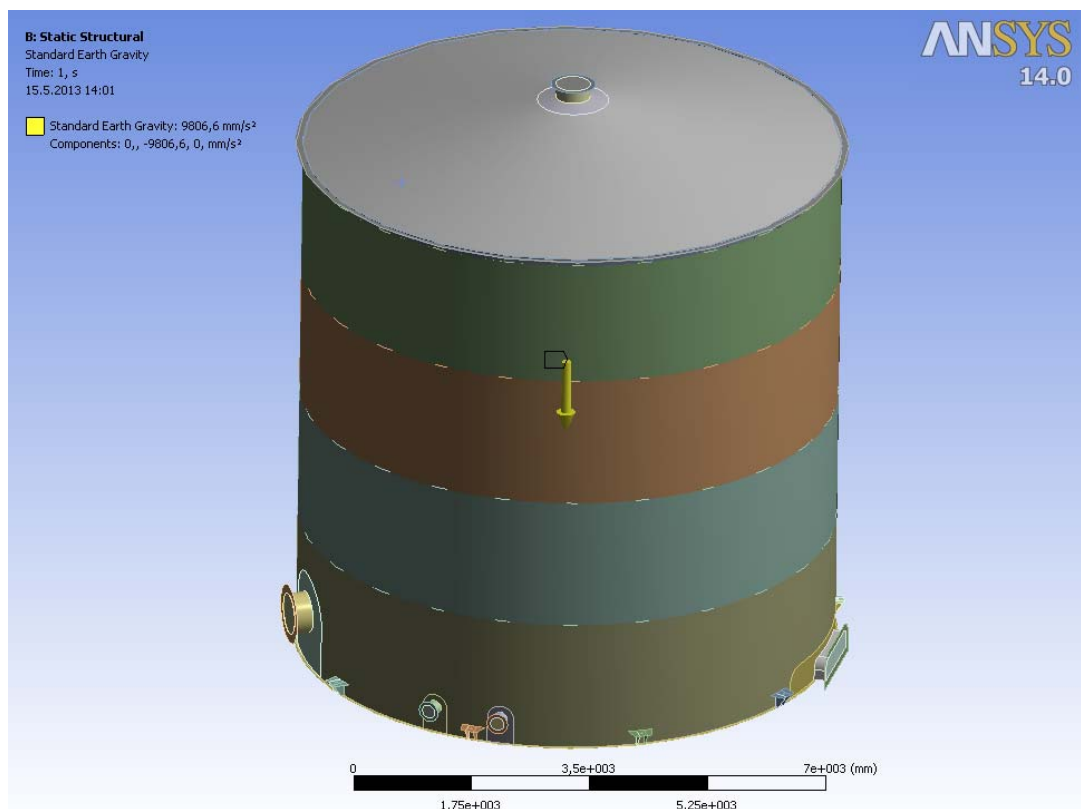
Obr. 1.36: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - střeša

#### Stav 4: odstávka nádrže – prázdná nádrž

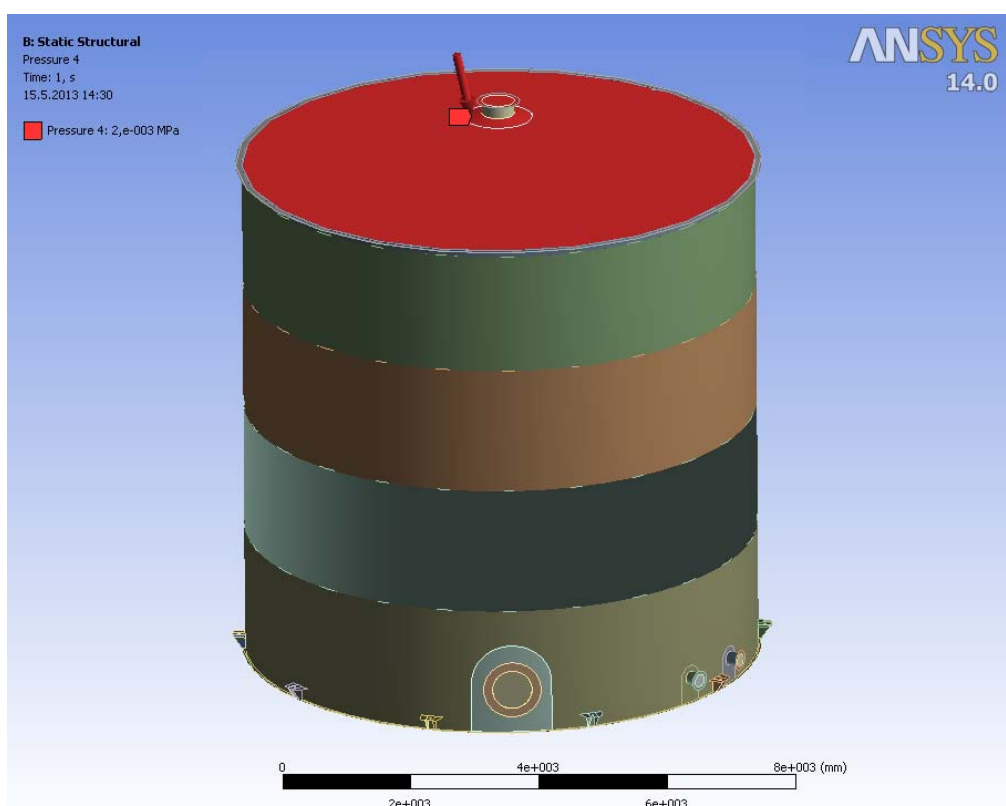
Cílem této analýzy bylo zjištění rozložení napětí ve střeše a plášti uskladňovací nádrže při odstávce, kdy je nádrž vyprázdněna a je namáhána pouze vlastní tíhou a sněhem. Jako okrajové podmínky byly zadány nulový posuv dna nádrže ve směru Y, a pevné přichycení děr pro šrouby na kotvách viz obr. 1.37. Dále bylo zadáno zatížení vlastní hmotností (obr. 1.38) a zatížení od sněhu (obr.1.39).



Obr. 1.37: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – omezení posuvu, pevné uchycení



*Obr. 1.38: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – vlastní tíhy*



*Obr. 1.39: Použité okrajové podmínky pro statickou analýzu – zatížení sněhem*

## Kategorizace napětí

Dovolené provozní napětí

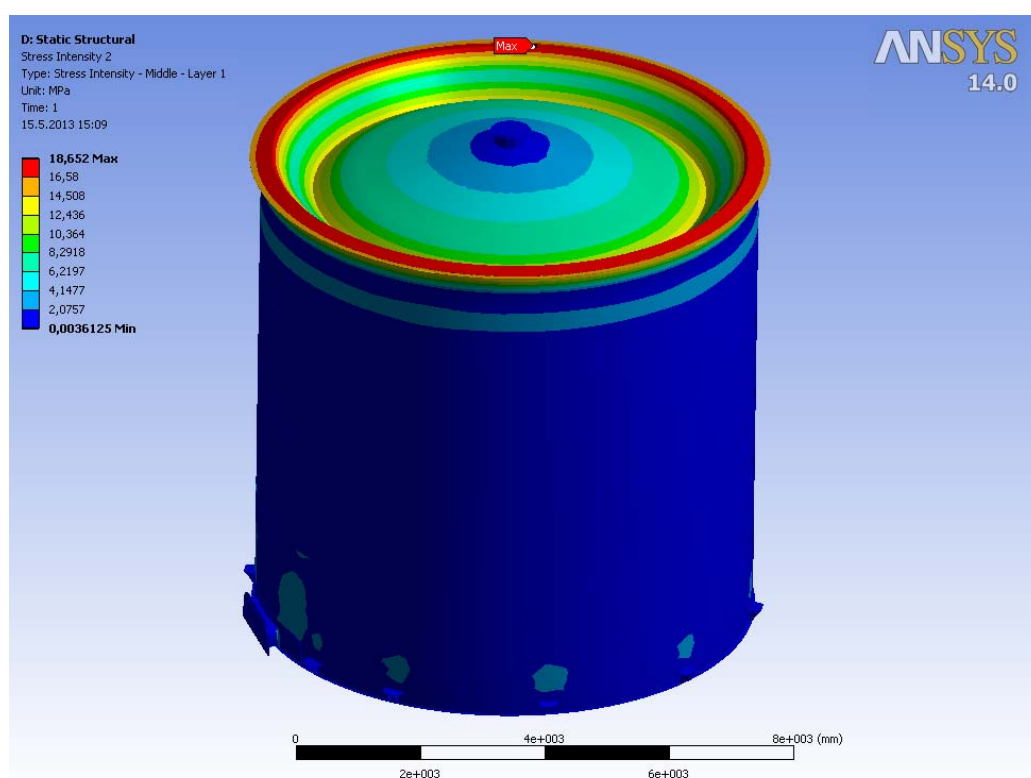
$$f = \min\left(\frac{2}{3} \cdot R_e; 260\right)$$

$$f = \min\left(\frac{2}{3} \cdot 235; 260\right)$$

$$f = 156,667 \text{ MPa}$$

## Omezení ekvivalentních primárních napětí

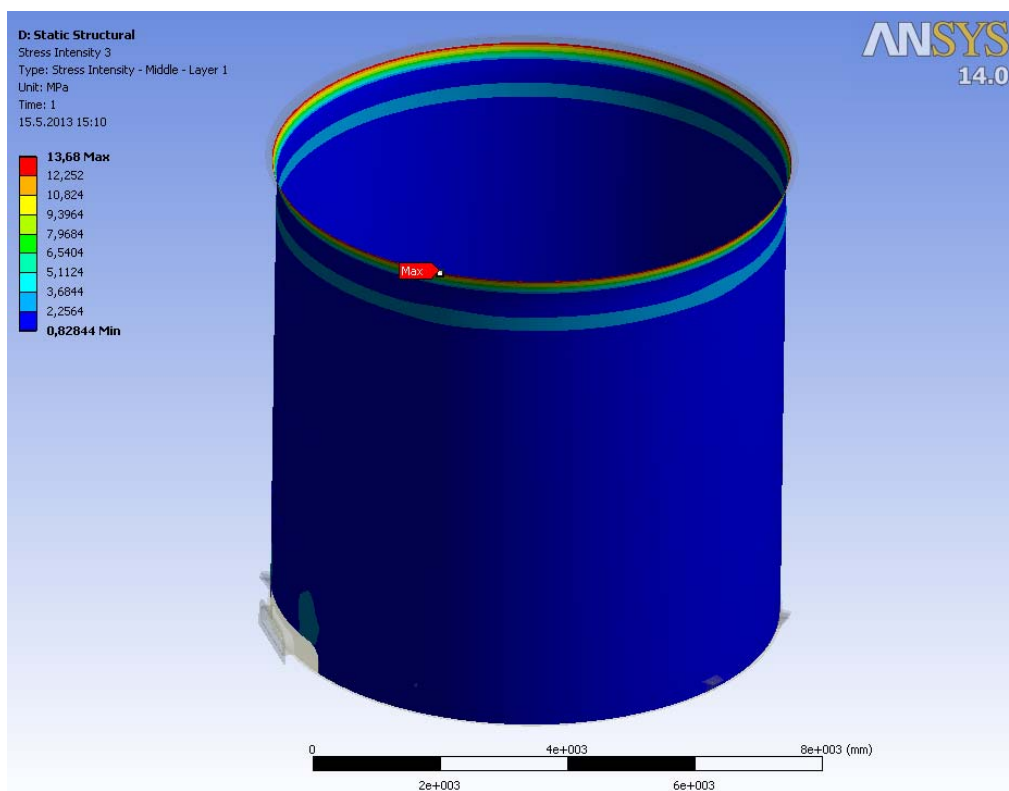
- pro membránové napětí v celé nádrži viz obr. 1.31



Obr. 1.31: Membránové napětí  $(\sigma)_1$

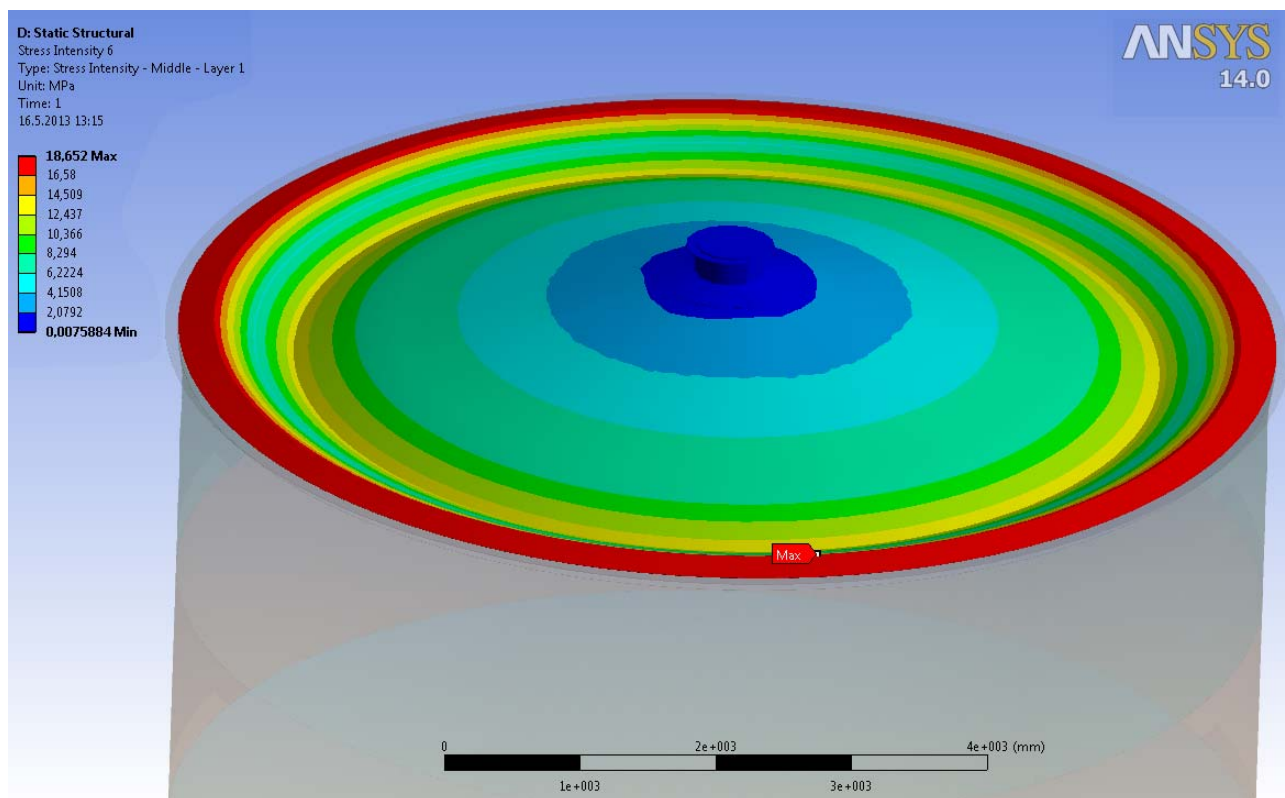


- pro membránové napětí na plášti viz obr. 1.32



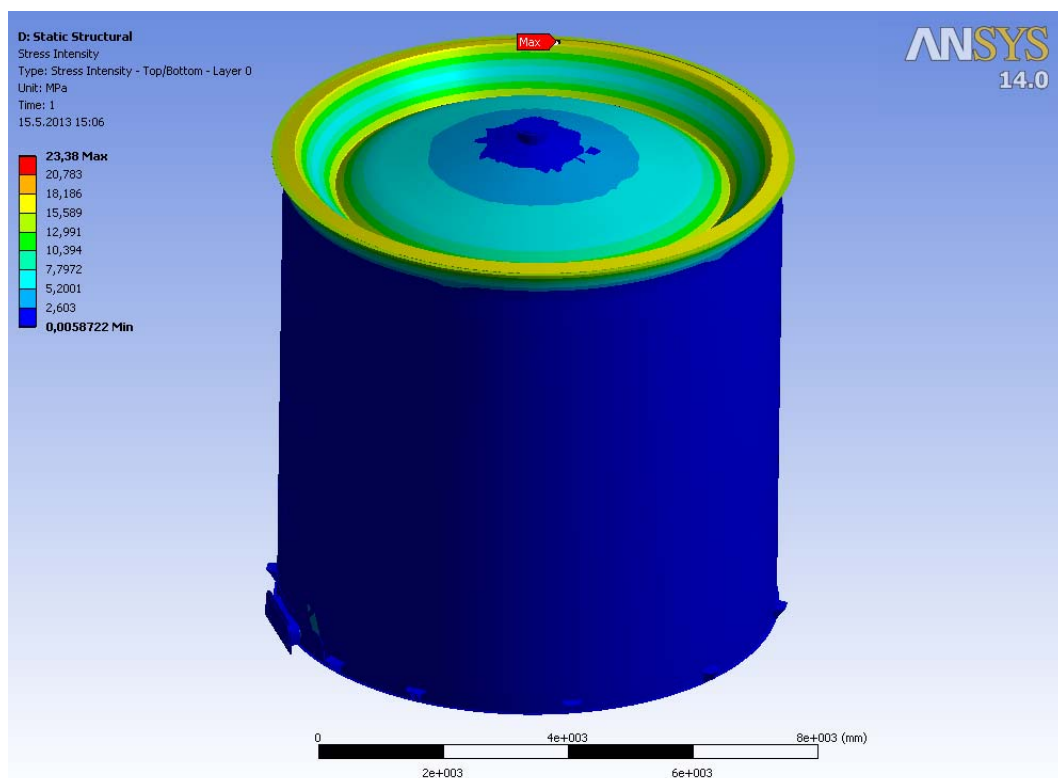
Obr. 1.32: Membránové napětí( $\sigma$ )<sub>1</sub> - plášť

- pro membránové napětí na střeše viz obr. 1.33



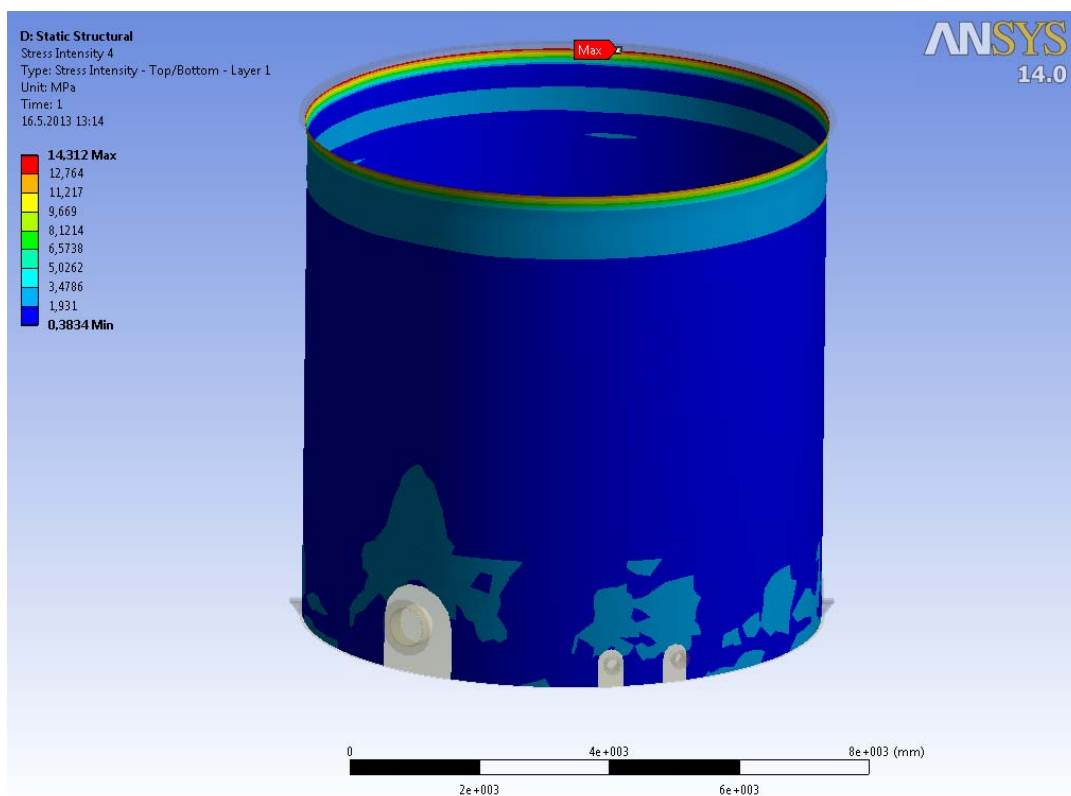
Obr. 1.33: Membránové napětí( $\sigma$ )<sub>1</sub> - střecha

- pro kombinaci membránové a ohybového napětí v celé nádrži viz obr. 1.34



Obr. 1.34: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$

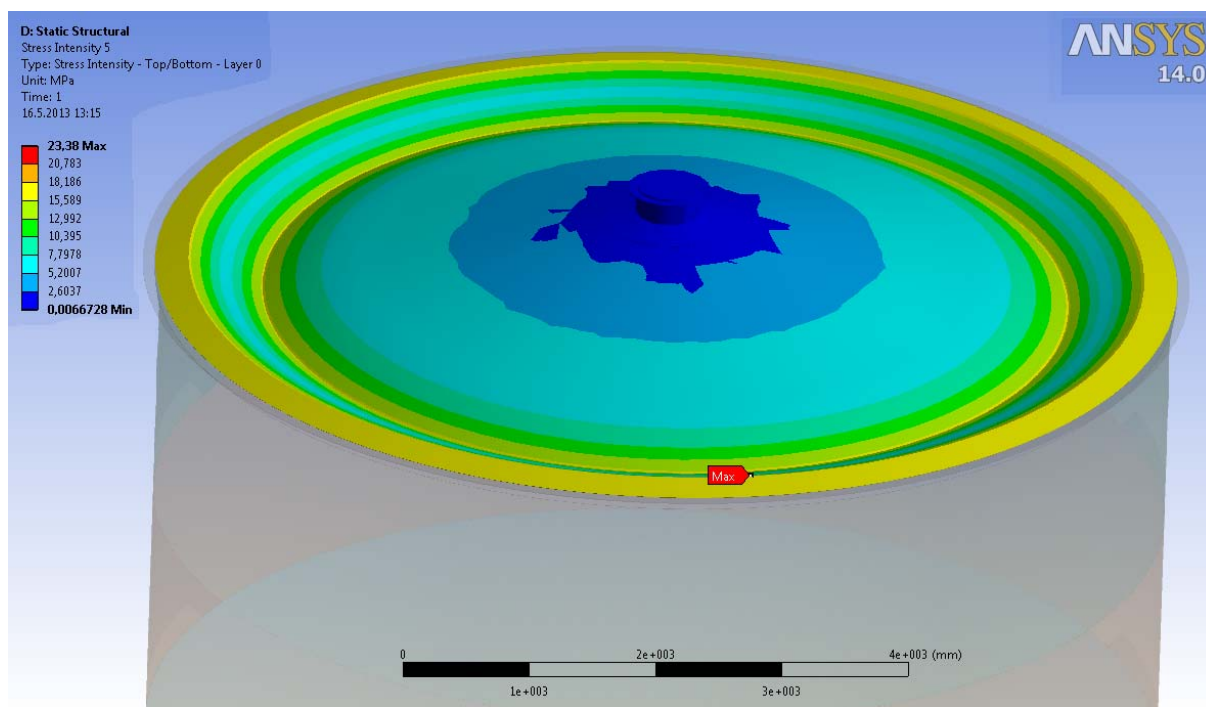
- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na plášti viz obr. 1.35



Obr. 1.35: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - plášť



- pro kombinaci membránové a ohybového napětí na střeše viz obr. 1.36



Obr. 3.36: Membránové + ohybové napětí  $(\sigma)_2$  - střecha

### Závěr napěťové analýzy:

Všechny výsledky zátěžných stavů byly zapsány do Tab. 1.2, kde pak byly porovnány s dovolenými hodnotami namáhání. Žádná hodnota na plášti a střeše nepřesahuje dovolené namáhání. Nádrž vyhovuje.

Tab. 1.2: Hodnoty napětí ve všech zátěžných stavech

<b>Zkušební stav</b>						
Oblast	$(\sigma)_1$ [MPa]	$\diamond$	f [MPa]	$(\sigma)_2$ [MPa]	$\diamond$	$1,5 \cdot f$ [MPa]
Plášť	89,174	<	176,25	102,81	<	264,375
Střecha	31,997	<	176,25	54,956	<	264,375
<b>Provozní stav s přetlakem</b>						
Oblast	$(\sigma)_1$ [MPa]	$\diamond$	f [MPa]	$(\sigma)_2$ [MPa]	$\diamond$	$1,5 \cdot f$ [MPa]
Plášť	88,861	<	156,667	103,91	<	235
Střecha	5,678	<	156,667	7,13	<	235
<b>Provozní stav s podtlakem</b>						
Oblast	$(\sigma)_1$ [MPa]	$\diamond$	f [MPa]	$(\sigma)_2$ [MPa]	$\diamond$	$1,5 \cdot f$ [MPa]
Plášť	88,861	<	156,667	103,91	<	235
Střecha	5,678	<	156,667	7,13	<	235
<b>Odstávkový stav</b>						
Oblast	$(\sigma)_1$ [MPa]	$\diamond$	f [MPa]	$(\sigma)_2$ [MPa]	$\diamond$	$1,5 \cdot f$ [MPa]
Plášť	88,861	<	156,667	103,91	<	235
Střecha	5,678	<	156,667	7,13	<	235